

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Katedra hydrotechniky



DIPLOMOVÁ PRÁCE

2019

Jan ŠTÍCHA

SEZNAM ČÁSTÍ

Titulní strana – 1 x A4

Zadání bakalářské práce – 1 x A4

Prohlášení – 1 x A4

Poděkování – 1 x A4

Abstrakt a klíčová slova – 1 x A4

Diplomová práce – 52 x A4

Příloha 1 – PŘÍČNÉ ŘEZY HRÁZÍ

Příloha 2 – SITUACE HRÁZE

CD s nahranou diplomovou prací

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Katedra hydrotechniky



DIPLOMOVÁ PRÁCE

Průsaková a deformační analýza hráze SN Staré

Město pod Landštejnem

Seepage and deformation analysis of the Staré

Město pod Landštejnem dam

Vedoucí diplomové práce: Ing. Miroslav Brouček, Ph.D.

leden 2019

Jan ŠTÍCHA



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Štícha** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **412664**
Fakulta/ústav: **Fakulta stavební**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra hydrotechniky**
Studijní program: **Stavební inženýrství**
Studijní obor: **Vodní hospodářství a vodní stavby**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Průsaková a deformační analýza hráze SN Staré Město pod Landštejnem

Název diplomové práce anglicky:

Seepage and deformation analysis of the Staré Město pod Landštejnem dam

Pokyny pro vypracování:

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Miroslav Brouček, Ph.D., katedra hydrotechniky FSv

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **05.10.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **06.01.2019**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Miroslav Brouček, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Jiří Máca, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s metodickým pokynem ČVUT 1/2009 „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

.....
Praha, 6.1.2019

.....
Bc. Jan Štícha

Poděkování:

V první řadě patří moje poděkování Ing. Miroslavu Broučkovi, Ph.D. za trpělivé a shovívavé vedení mé práce, za čas, který mi věnoval při konzultacích, jakož i za nesmírně důležitou pomoc, kterou mi poskytl při řešení potíží s programem, ve kterém probíhalo samotné numerické modelování. Děkuji též Bc. Martinu Hladíkovi a potažmo Ing. Aleně Šindlerové za poskytnutí projektové dokumentace.

Poděkování také náleží všem společnostem, které mi poskytly studentskou licenci ke svému softwaru, jmenovitě firmě Fine, s.r.o. za poskytnutí programu GEO5, který umožnil naplnit zadání diplomové práce.

Nemůžu na tomto místě vynechat i krátké poděkování celé Fakultě stavební a lidem, kteří mě po celou dobu mého studia vzdělávali, a mají tedy zásluhu na tom, že jsem se dostal až k psaní z diplomové práce.

Nakonec, ale ne v poslední řadě, bych rád poděkoval svým rodičům a celé rodině za neochvějnou podporu jak během celého studia, tak v době přípravy předkládané práce, kdy byla tolik důležitá. Nemohu nezmínit ani své přátele, kterým patří dík nejen za povzbuzující slova. Děkuji!

ABSTRAKT A KLÍČOVÁ SLOVA

V práci jsou řešeny průsakové a stabilitní poměry SN Staré Město pod Landštejnem za podmínek převedení SN na vodní dílo s trvalým vodohospodářským provozem. Analýza byla provedena numerickým modelováním za užití metody konečných prvků v programu GEO5 – MKP.

V rámci průsakové analýzy je provedena kalibrace na základě měřených hladin v kontrolních vrtech. Stabilitní analýza se opírá o průběhy hladin vypočtených v provedené simulaci průběhu vypouštění nádrže. Byly vypočteny hodnoty průsaku tělesem hráze pro navrhované zásobní hladiny a stupně stability FS pro jednotlivé stavy z průběhu vypouštění nádrže.

Klíčová slova: SN Staré Město pod Landštejnem, numerické modelování, průsaková analýza, deformační analýza, metoda konečných prvků

ABSTRACT AND KEY WORDS

This thesis addresses the seepage and stability properties of the Staré město pod Landštejnem dam under the conditions of transforming the dam into a dam with continuous water resource management service. The analysis was conducted by numerical modeling using the finite element method in the GEO5-MKP software.

Under the framework of seepage analysis, a calibration is conducted on the basis of measured levels in the controlling drill holes. The stability analysis is based on the water level courses calculated within a simulation of drain courses. Seepage values for the body of the dam were calculated for the proposed reserve surfaces and stability degrees FS for respective states of the drain course.

Key words: Staré Město pod Landštejnem dam, numerical modeling, seepage analysis, deformation analysis, finite element method

OBSAH:

1. ÚVOD.....	4
2. POPIS SUCHÉ NÁDRŽE STARÉ MĚSTO POD LANDŠTEJNEM	5
2.1 Zájmová lokalita	5
2.2 Obecné informace.....	5
2.2.1 VD Landštejn.....	5
2.2.2 Úpravna vody Staré Město pod Landštejnem.....	6
2.3 Účel SN	6
2.4 Těleso hráze	6
2.5 Výpustné objekty	7
2.6 Výstavba	9
2.7 Nádrž	10
2.8 Hydrologické údaje.....	10
2.9 Kontrolní a měřicí zařízení	11
3. SOUHRNNÝ POPIS PROUDĚNÍ PODZEMNÍ VODY	12
3.1 Van Genuchtenův materiálový model proudění	14
3.2 Gardnerův materiálový model proudění	14
3.3 Anizotropie zemního prostředí	15
4. STRUČNĚ O METODĚ KONEČNÝCH PRVKŮ	16
4.1 Jednotlivé kroky MKP při řešení obecného problému	17
5. STABILITA ZEMNÍ KONSTRUKCE	18
6. PRŮSAKOVÁ ANALÝZA	19
6.1 Postup	19
6.2 Konvergence výpočtu a časová náročnost.....	20
6.3 Kalibrace.....	21
6.3.1 Topologie kalibračního modelu.....	21

6.3.2 Sít' konečných prvků	24
6.3.3 Kontrolní vrty	25
6.3.4 Kalibrační graf a časové fáze modelu.....	26
6.3.5 Počáteční a okrajové podmínky.....	27
6.3.6 Soubory vstupních parametrů.....	28
6.3.7 Výsledky kalibrace	30
6.4 Řez 8-8.....	32
6.5 Velikost průsaku tělesem hráze	32
6.6 Simulace vypouštění.....	33
6.6.1 Konzumní křivka SV	33
6.6.2 Průběh vypouštění	34
6.6.3 Model vypouštění	36
6.7 Zhodnocení průsakové analýzy	41
7. DEFORMAČNÍ ANALÝZA	42
7.1 Topologie modelů.....	42
7.2 Okrajové podmínky	42
7.3. Parametry materiálů.....	43
7.4 Řez 7-7B	43
7.5 Řez 7-7A.....	44
7.6 Řez 8-8B	44
7.7 Řez 8-8A.....	45
7.8 Zhodnocení stabilitní analýzy.....	46
8. ZÁVĚR.....	47
9. SEZNAM LITERATURY A POUŽITÝCH PODKLADŮ	48
10. SEZNAM OBRÁZKŮ, GRAFŮ, TABULEK A PŘÍLOH.....	50
10.1 Obrázky	50
10.2 Tabulky.....	51

10.3 Grafy	51
10.4 Přílohy	52

1. ÚVOD

V souvislosti s plánovanou opravou VD Landštejn vyvstala otázka možného využití SN Staré Město pod Landštejnem jako vodního díla s trvalým vodohospodářským provozem. SN by v takovém případě převzala na určitou dobu část některých účelů rekonstruovaného VD Landštejn. Na rekonstrukci SN na nádrž s trvalým vodohospodářským provozem lze také nahlížet v obecnějším kontextu řešení stále palčivějšího problému sucha, kdy je rekonstrukce suchých nádrží na díla se zásobou vody jednou z možností lokálního zmírňování dopadu úbytku srážkových úhrnů. V rámci posuzování takového záměru je, kromě mnoha jiných aspektů, jistě užitečné vyšetřit chování hráze z hlediska průsaku a stability za nových podmínek využití zásobního prostoru nádrže.

Redundantní průsaková a stabilitní analýza je náplní předkládané práce. Užito bylo numerického modelování metodou konečných prvků. Všechny modely, jejichž výsledky jsou v práci předkládány, vznikly v prostředí programu GEO5-MKP. Užitá data vychází většinou z projektové dokumentace a zpráv TBD. Vzhledem ke komplexnosti problému bylo zapotřebí vždy najít zjednodušující předpoklady tak, aby bylo možno analýzu provést a zároveň byla realita, pokud možno, co nejméně pokřivena. V případě průsakové analýzy byl model kalibrován na základě měřených hladin při funkční zkoušce VD, následně byl vypočítán průsak celým tělesem hráze za ustáleného proudění pro navrhované varianty zásobní hladiny a konečně modelován průběh vypouštění nádrže. Hladiny podzemní vody zjištěné touto analýzou pak byly užity v rámci stabilitní analýzy, neboť rychlý sestup hladiny vody v nádrži vyvolává z hlediska stability nejméně příznivé stavy.

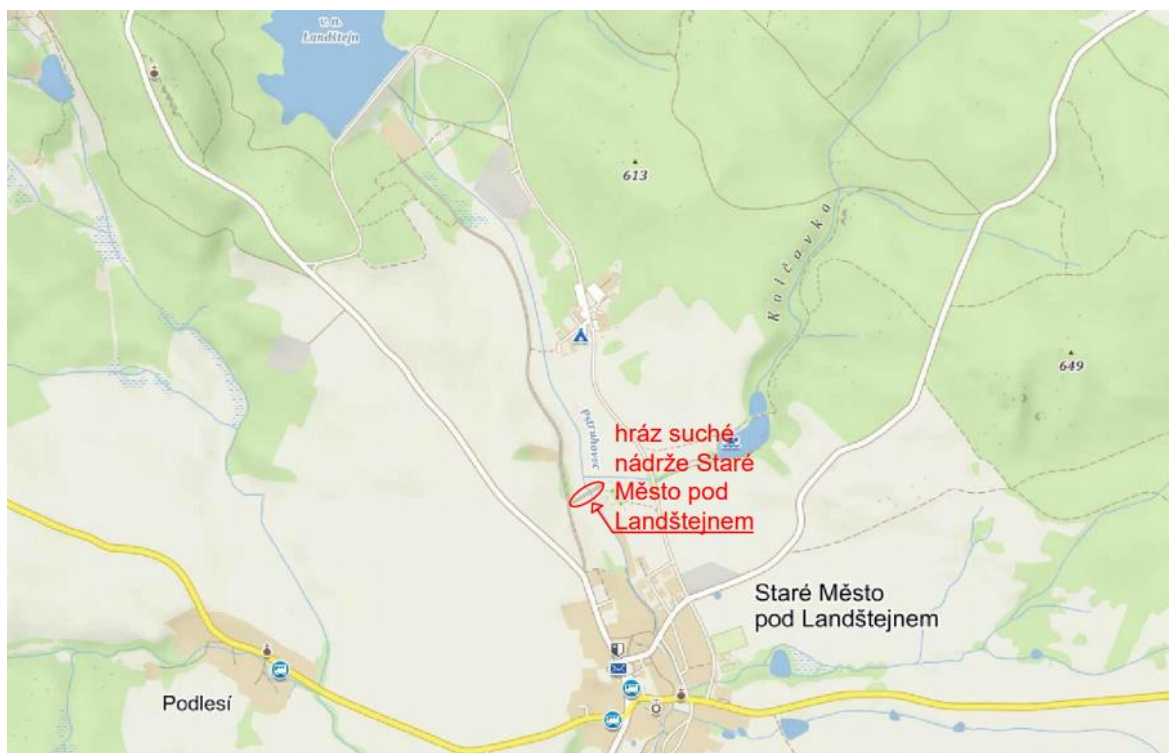
Práce též předkládá 4 stručné kapitoly vysvětlující základy užitých metod a popisující zájmovou SN tak, aby bylo zřejmé, z čeho následné analýzy vycházejí.

Veškeré výškové kóty uvedené v práci jsou v Baltském výškovém systému po vyrovnání (Bpv).

2. POPIS SUCHÉ NÁDRŽE STARÉ MĚSTO POD LANDŠTEJNEM

2.1 Zájmová lokalita

Suchá nádrž Staré Město pod Landštejnem (dále jen SN) se nachází v okrese Jindřichův Hradec v Jihočeském kraji, v katastrálním území Staré Město pod Landštejnem. Leží na toku Pstruhovec (ř.km 7,728 [1]) cca 0,3 km severně od Starého Města pod Landštejnem. SN spadá do oblasti závodu Dyje státního podniku Povodí Moravy.



Obrázek 1: Zájmová lokalita [2]

2.2 Obecné informace

Vlastníkem i provozovatelem vodního díla je městys Staré Město pod Landštejnem. SN je zařazena mezi vodní díla III. kategorie. [3] Obecně, ale zejména i v kontextu práce, je potřeba zmínit dva objekty, které se SN souvisejí:

2.2.1 VD Landštejn

Vodní dílo leží asi 1400 m [2] severně od SN, tedy výše na toku Pstruhovec. Ovlivňuje proto průtoky v toku v SN. Hráz je sypaná, kamenitá, vybavena těsněním na návodní straně z PVC

folie. Celkový objem nádrže je 3,266 mil. m³ při hladině na kótě 573,3 m n.m. [4] a plocha zátopy 40 ha. Hlavním účelem díla je zajistit vodu pro úpravnu vody ve Starém Městě pod Landštejnem. [5] Na VD Landštejn je plánována rekonstrukce. Právě v rámci této rekonstrukce se uvažuje o úpravě účelů VD Suchá nádrž Staré Město pod Landštejnem. SN by v takovém případě zajišťovala část odběrů pro technologii úpravy vody.

2.2.2 Úpravna vody Staré Město pod Landštejnem

Úpravna byla postavena na konci 70. let minulého století, rekonstruována v roce 2018. Celková kapacita úpravy je až 70 l/s, na každé ze dvou linek 35 l/s. Úpravnu provozuje společnost ČEVAK a.s. [6]

2.3 Účel SN

Vodní dílo má v současné době jediný, a to sice protipovodňový účel. Dílo vzniklo jako protipovodňová ochrana Starého Města pod Landštejnem. Jinými slovy, účel SN je redukce kulminačního průtoku v toku Pstruhovec v retenčním prostoru SN. [7] [3]

2.4 Těleso hráze

Přehradní těleso SN Staré Město pod Landštejnem je sypaná zemní hráz z místních materiálů (materiál hráze zaříděn jako S4/SM, hutnění min. 95 % Proctor Standard). Návodní i vzdušní svahy jsou vybudovány ve sklonu 1:3 s jednou přítěžovací lavicí. Koruna hráze s nadmořskou výškou v ose 548,525 m n.m. je opatřena komunikací složenou z podkladní vrstvy kameniva a povrchem z hutněného asfaltbetonu tloušťky 5 cm. Komunikace je široká 3,5 m, celková šířka koruny je 5 m. Hráz je v ose koruny dlouhá 114 m. Oba svahy jsou pokryty ohumusováním a osetím na prostorovou matraci ENKAMAT. Pod touto matrací je na návodním svahu ještě vrstva štěrkopískového filtru (G3/G-F).

U vzdušní paty hráze je umístěn drenážní násyp ze štěrku frakce 8-32. Mezi drenážním násypem a základovou spárou a rovněž mezi drenážním násypem a samotným materiálem hráze je umístěna vrstva štěrkopískového filtru G3/G-F tloušťky 300 mm. V drenážním násypu je umístěno sběrné potrubí PE100 DN200.

Ve středu údolí je výška hráze od základové spáry po korunu cca 7 m, tamtéž má hráz šířku od paty k patě 47 m.

Z architektonického hlediska je hráz navržena tak, že velmi málo narušuje ráz krajiny, a to sice jak díky osetí obou svahů, tak zavázáním bezpečnostního přelivu do přirozeného skalního ostrohu. [1] [8]



Obrázek 2: Pohled na vzdušní svah hráze, autor: Martin Hladík, 26.9.2018

2.5 Výpustné objekty

Hráz disponuje základovou výpustí, tvořenou obetonovanou ocelovou rourou o průměru 1200 mm na vtoku a 1600 mm na výtoku, vtokovým a výtokovým objektem. Vtok je vybaven česlemi, výtok mřížovými dveřmi proti vniknutí zvěře či nepovolaných osob. Manipulační šachta, ke které je přístup z koruny hráze, je navržena dle typového objektu VOOM 700/120 z typového podkladu III-D-31. Oproti typovému objektu je místo šoupátka DN300 šachta vybavena lopatovým uzávěrem 1000x1200 mm na otvoru. [1]



Obrázek 3: Výtokový objekt, autor: Martin Hladík, 26.11.2018

Bezpečnostní přeliv s přelivnou hranou na kótě 547 m n.m. je postaven při zavázání do levého břehu, zaoblená přelivná hrana z opracovaného kamene je dlouhá 17 m. Na přeliv navazuje spadiště a skluz (obojí opevněno kamennou dlažbou do betonu), který je veden v terénu mimo přehradní těleso. Na skluz navazuje odpadní koryto, které ústí do spodního koryta Pstruhovce. Pro tlumení kinetické energie je jak odpadní koryto od skluzu tak koryto pod spodní výpustí vyskládáno štětovitě těžkým lomovým kamenem. [1] [8]



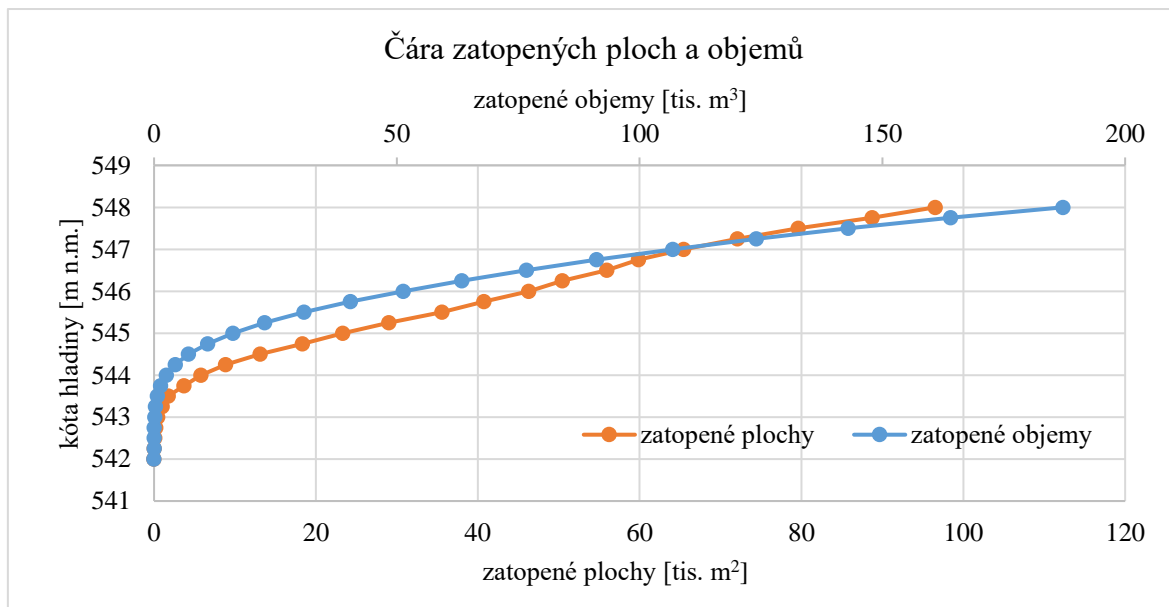
Obrázek 4: Skluz a odpadní koryto od bezpečnostního přelivu, zdroj: [7]

2.6 Výstavba

Výstavba hráze proběhla v období červen až prosinec 2007. Dodavatel stavby byla firma PASPLUS s.r.o., stavbyvedoucí Ing. Luboš Janák, která stavbu vyhotovila dle projektové dokumentace zpracované firmou ALCEDO, konkrétně projektantem Ing. Martinem Růžičkou. Samotné sypání hráze proběhlo od půle srpna do konce září 2007. Dokončená stavba byla převzata 14.11.2007. [9]

2.7 Nádrž

Grafy charakteristik nádrže vychází z dat převzatých z [6], vytvořených na základě digitálního modelu reliéfu (v projektové dokumentaci totiž nejsou k nalezení):



Graf 1: Čára zatopených ploch a objemů

Území zátopy je užíváno jako louka. Břehy jsou bez opevnění, částečně porostlé stromy. Koryto Pstruhovce je většinově přírodního charakteru, na kraji zátopy se nalézají lávky pro chodce.

2.8 Hydrologické údaje

Průtok v toku Pstruhovec (číslo hydrologického pořadí 4-14-01-065) se skládá z transformovaného odtoku z VD Landštejn a přítoku z mezivodí (povodí náležející části toku mezi profilem hráze VD Landštejn, ř. km 9,18 [4], a profilem hráze SN, ř. km 7,728). Toto mezipovodí má plochu 4,69 km² [1]. Na žádost projektanta byly ČHMÚ poskytnuty pro toto mezipovodí následující hodnoty N-letých průtoků:

Tabulka 1: N-leté průtoky [1]

N [roky]	1	2	5	10	20	50	100
Q_N [m ³ /s]	0.7	1.3	2.6	3.9	5.7	8.7	11.5

N [roky]	200	500	1000
Q_N [m ³ /s]	14.9	20.5	25.6

Dále byla poskytnuta hodnota objemu tisícileté povodňové vlny $WPV_{1000} = 455\,000\text{ m}^3$ [1].

2.9 Kontrolní a měřicí zařízení

V přehradním tělese byly provedeny 3 vrty a 1 v podhrází. Na koruně hráze je osazeno 5 kontrolních výškových bodů a 5 na manipulačním objektu výpustného zařízení (manipulační šachta), na vtokovém a výtokovém objektu 3 kusy na každém, 2 kusy na bezpečnostním přelivu a 4 kusy na opěrné zdi podél skluzu.

Vybudovány byly též nově 3 vztažné výškové body v blízkosti hráze.

Podél schodiště byla osazena šikmá vodočetná lať. [3]

3. SOUHRNNÝ POPIS PROUDĚNÍ PODZEMNÍ VODY

Proudění podzemní vody lze dělit na ustálené a neustálené. Ustálené proudění je časově nezávislé, neustálené počítá se změnou podmínek v čase. Neustálené proudění podzemní vody rozlišujeme dle typu skeletu – zdali je tuhý či se v čase deformuje. Úlohy spojené s vyrovnáním zvýšených pórových tlaků v deformujícím se tělese se nazývají konsolidací. V teoretické rovině se až na výjimečné zjednodušující případy konsolidace jedná o plně sdružený problém. V reálném prostředí není porézní skelet nikdy nekonečně tuhý, ale jeho deformace – například jako v numerickém modelování v této práci – se dá zanedbat, aniž by došlo k významnějším nepřesnostem. V této práci budou po zavedení zjednodušujících předpokladů modelovány hydraulické jevy ustáleného proudění a proudění neustáleného ve zcela tuhém (nedeformujícím se) prostředí.

Zemní těleso lze rozdělit na oblasti plně nasycené a oblasti nenasyčené. Proudění je v těchto oblastech značně odlišné. Mluvíme pak o proudění v nasycené, respektive nenasyčené zóně. V této práci bude modelováno proudění jak v nasycené, tak nenasyčené zóně.

Základní rovnicí proudění podzemní vody je rovnice kontinuity neboli zákon o zachování hmotnosti. Slovně vyjádřeno, změna objemu vody v oblasti za určitý čas se bude rovnat rozdílu vstupu do této oblasti a výstupu z této oblasti v tomtéž časovém intervalu. Celkovou bilanci průchodu vody určitou plochou P lze vyjádřit jako:

$$Z^{in} + Z^{out} = - \int_P n^T (nS\rho^w v^w) dP \Delta t$$

$$Z^{in} + Z^{out} = Z$$

Kde Z^{in} je vstup a Z^{out} je výtok do/z oblasti. Z je celková změna objemu vody v oblasti (Z^{out} bude záporné). Pórovitost představuje n , stupeň nasycení S a v^w je vektor rychlosti vody proudící póry, ρ^w představuje hustotu vody. Rychlost proudění vody je tedy uvažována jako hustota toku:

$$q = v = nS\rho^w v^w \text{ (m/s)}.$$

Do rovnice vstupuje veličina m představující vnitřní zdroj (s^{-1}). Použitím Greenovy věty a užitím uvedených rovnic lze s dalšími úpravami tvaru rovnice a za předpokladu, že hustota vody ρ^w a pórovitost n jsou konstantní, dosáhnout pro libovolnou oblast Ω tvaru:

$$n \frac{\partial S}{\partial t} + \text{div}[nSv^w] = m$$

V případě ustáleného proudění se tvar zjednoduší na:

$$\text{div}[nSv^w] = m$$

Dosažením Darcy-Buckinghamova zákona do rovnice kontinuity vzniká řídicí rovnice proudění vody, která se nazývá Richardsova a pro trojrozměrné prostorové proudění má tvar:

$$\frac{d\theta}{dt} = \text{div}(K\nabla h + K_{*3})$$

A platí za následujících zjednodušujících předpokladů:

- Prostředí je nehybné a nedeformovatelné
- Neuvažuje se vliv vzduchu na proudění vody, tlak vzduchu v pórech má hodnotu atmosférického tlaku
- Voda je nestlačitelná

Konstitutivní rovnice jsou řízeny Darcyho zákonem, který definuje vztah mezi hustotou toku a gradientem pórového tlaku či celkové výšky.

Gradienty h nebo p lze popsat vztahem pro 2D proudění (obdobně pro 3D proudění):

$$\nabla h = \left\{ \frac{\partial h}{\partial x}, \frac{\partial h}{\partial y} \right\}^T$$

Darcyho zákon je omezen na oblast lineárního laminárního proudění, které se běžně vyskytuje v zemním prostředí, takže je aplikovatelný pro řešení většiny úloh proudění podzemní vody.

V prostředí částečně nasycených zemin, je koeficient hydraulické vodivosti K_{sat} plně nasycené zeminy zmenšován relativním součinitelem propustnosti K_r v závislosti na velikosti záporného tlaku (v nenасыcené zemině je permeabilita tím menší, čím větší je velikost záporné tlakové výšky, to je definováno právě za pomoci K_r , jakožto funkce záporného tlaku h_p).

$$nSv^w = -K_r K_{sat} \nabla h$$

$$nSv^w = -\frac{K_r}{\gamma_w} K_{sat} (\nabla p - \gamma_w i_g)$$

Kde i_g je jednotkový vektor ve směru tíhového zrychlení.

Je zřejmé, že $K_r \in < 0; 1 >$. Existuje několik přístupů k funkci K_r – tyto přístupy jsou obvykle označovány jako materiálové modely proudění nebo modely součinitele relativní permeability. Předpisy této funkce, které umožňuje do výpočtu zavést program Geo5 MKP, jsou van Genuchtenův, Gardnerův a Log-lineární model. V práci byl užit van Genuchtenův a Gardnerův model. [10] [11] [12] [13]

3.1 Van Genuchtenův materiálový model proudění

Předpis funkce van Genuchtenova modelu je:

$$K_{r(h_p)} = \frac{\{1 - (\alpha|h_p|)^{n-1} \cdot [1 + (\alpha|h_p|)^n]^{-m}\}^2}{[1 + (-\alpha h_p)^n]^{m/2}}$$

Kde α, n a m jsou regresní parametry modelu (n v tomto případě nemá nic společného s pórovitostí), přičemž:

$$m = 1 - 1/n$$

A tedy chování zeminy v nenasycené zóně (za předpokladu známých parametrů pro chování v nasycené zóně) je definováno dvěma parametry α a n .

Vztah mezi regresními parametry modelu a retenční křivkou zeminy je možné vyjádřit přes parametr θ – normalizovaný obsah vody:

$$\theta = \left(\frac{1}{1 + (\alpha \cdot h_p)^n} \right)^m$$

Kde α, m a n jsou regresní parametry modelu, h_p záporná tlaková výška. Přičemž zároveň platí, že:

$$S = S_r + (S_{sat} - S_r) \cdot \theta$$

Jinak vyjádřeno:

$$\theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

$$\theta = n \cdot S$$

Kde θ je normalizovaný obsah vody, S stupeň nasycení, S_{sat} saturovaný stupeň nasycení ($S_{sat} = 1$ při zjednodušujícím předpokladu úplného vyplnění pórů vodou saturované zeminy), reziduální stupeň nasycení S_r a konečně θ objemová vlhkost a n pórovitost. [12] [10] [13]

3.2 Gardnerův materiálový model proudění

Gardnerův materiálový model je charakterizován vztahy:

$$K_{r(h_p)} = e^{a \cdot h_p}$$

$$\theta = K_r^b$$

Kde $K_{r(h_p)}$ je funkce relativního součinitele propustnosti, h_p záporná tlaková výška, θ je normalizovaný obsah vody, e Eulerovo číslo a a, b parametry modelu. [10] [13]

3.3 Anizotropie zemního prostředí

K_{sat} obvykle není v zemním prostředí stejné ve všech směrech. K_{sat} je tedy ve skutečnosti tenzorem nasycené hydraulické vodivosti. Program GEO5 předpokládá takzvanou transverzální izotropii, tedy odlišnou vodivost ve směru osy a kolmo na ní. K_{sat} lze potom vyjádřit jako $K_{sat,x}$ a $K_{sat,z}$. Taková anizotropie bývá obvyklá například z důvodů rozdílných tlaků působících v různých hloubkách půdy, nebo vyplývající ze způsobu výstavby. Konkrétně při výstavbě zemní hráze vzniká tato anizotropie dvojím způsobem – zemní těleso je sypáno a hutněno po vrstvách – rozhraní těchto vrstev vede vodu přirozeně ve směru osy x a zároveň v důsledku hutnění (které probíhá kolmo na osu x) je v rámci jedné vrstvy vodorovná vodivost větší než vodivost ve svislém směru. Poměr mezi vodivostmi v těchto směrech potom vyjadřuje součinitel λ [11] :

$$\lambda = \frac{K_{sat,x}}{K_{sat,z}}$$

4. STRUČNĚ O METODĚ KONEČNÝCH PRVKŮ

Metoda konečných prvků (dále jen MKP – v anglickém jazyce Finite element method, FEM) je metoda sloužící k řešení okrajových úloh (boundary value problems), jejímž hlavním principem je rozdělení spojitých oblastí na geometrické tvary (tvořící “sít”), v jejichž uzlech je pak výpočtem určována požadovaná veličina. Obvyklé je užití trojúhelníkových či čtyřúhelníkových prvků. Uvnitř prvku je neznámá veličina aproximována na základě známých okolních uzlových hodnot.

Tímto principem se stává nedocenitelným pomocníkem v celé řadě oborů. Z hlediska stavebnictví se metoda stává silným nástrojem pro výpočet napětí, sil a deformací. Lze s ní vypočítat uvedené veličiny i na geometricky či jinak složitých konstrukcích, kde je jednoduché analytické řešení či použití empirických vzorců nemožné, nebo příliš zkresluje skutečnost. To samé pak platí u řešení problémů geomechaniky (například sedání zemin) nebo právě u aproximace proudění podzemní vody. Nespornou výhodou metody je též přehlednost výsledků, které jsou v závislosti na užitém konkrétním programu obvykle zpracovány do přehledných grafických výstupů.

Ani MKP ale nedokáže zachytit všechny aspekty reality, a tak je třeba si uvědomovat, že se jedná o její pouhou aproximaci a dle toho také přistupovat k výstupům metody. Určitá nepřesnost je přímo zakořeněna už v principu metody – požadovaná veličina je vypočtena v uzlech prvků (neboli v určitých bodech kontinua), zatímco v ploše (objemu) prvku je dopočítána pomocí matematické funkce (například lineární, polynomické) na základě uzlových hodnot, ta ale nemusí odpovídat (a většinou přesně neodpovídá) matematické funkci popisující veličinu. Další chyby mohou vyplývat například ze zadání vstupních parametrů (například parametrů zemin v geomechanice) – ty nemusí být zcela známe ani při důkladném průzkumu (či je zapotřebí se vzdát jejich přesnosti s cílem zajistit stabilitu výpočtu, nebo omezit jeho časovou náročnost), nebo z nutnosti zjednodušení příliš složité geometrie. Obecně vzato je model vždy maximálně tak přesný, jak přesné jsou zadávané parametry.

Ty však i při nejlepší vůli uživatel v naprosté většině případů nemá kompletní a tak jejich hodnoty musí získat jiným způsobem – z literatury, ze zkušenosti a především kalibrací, jak je tomu i v této práci. [12] [13]

4.1 Jednotlivé kroky MKP při řešení obecného problému

MKP se dá při velkém zjednodušení shrnout do následujících kroků:

1. Zadání geometrie zkoumané oblasti (geometrie hráze, stropní desky atd.)
2. Zadání parametrů a vlastností materiálů.
3. Zadání vlastností každé oblasti (obvykle přiřazení materiálů určitých vlastností každé oblasti).
4. Diskretizace na jednotlivé prvky. Většina programů je vybavena automatickou generací sítě konečných prvků, lze ale i tak přistoupit k ručnímu zhuštění sítě v oblastech, kde se očekává rychlý vývoj hledané veličiny.
5. Přisouzení okrajových podmínek (například známé zatížení od vedlejší konstrukce, vtok nebo nepropustnost). V praxi jsou tyto podmínky obvykle přisuzovány určité linii, program sám přisoudí podmínky přímo uzlům.
6. Po převedení prvků do globálního souřadného systému se sestaví soustava lineárních či linearizovaných rovnic, pro počet rovnic je určující počet stupňů volnosti.
7. Proveďte řešení soustavy rovnic, které vytvoří aproximaci chování spojitě oblasti.
8. Vypočtené hodnoty se číselně či graficky zobrazí (postprocessing). Uživatel má možnost nahlížet a zpracovávat či exportovat různé dílčí výstupy (hodnoty vypočtených veličin). [12]
[13]

5. STABILITA ZEMNÍ KONSTRUKCE

Následující kapitola popisuje přístup k stabilitě konstrukce (respektive jejího svahu), který je v rámci MKP aplikován v kapitole 7.

Stabilitu konstrukce určuje takový stav posunutí a napětí, při kterém je zatížení a odpor konstrukce v rovnováze. Míra stability je určena stupněm stability FS. FS je definován jako nejvyšší hodnota redukce pevnostních parametrů zemin, při kterých konstrukce zůstává stabilní.

$$FS = \frac{P}{P_{lim}}$$

Kde P je vzdorující (pasivní) síla a P_{lim} limitní vzdorující síla. Při předpokladu:

$$P_{lim} = A$$

Kde A je síla aktivní (způsobující posun), lze FS vyjádřit jako:

$$FS = \frac{P}{A}$$

Při užitém materiálovém modelu Mohr-Coulomb je smyková pevnost definována soudržností c a úhlem vnitřního tření φ (tedy P je funkcí c a φ), které umožňují stanovení podmínek plasticity. Analogicky k vyjádření P_{lim} lze vyjádřit jejich limitní hodnoty jako:

$$c_{lim} = \frac{c}{FS}$$

$$\text{tg}(\varphi_{lim}) = \frac{\text{tg}(\varphi)}{FS}$$

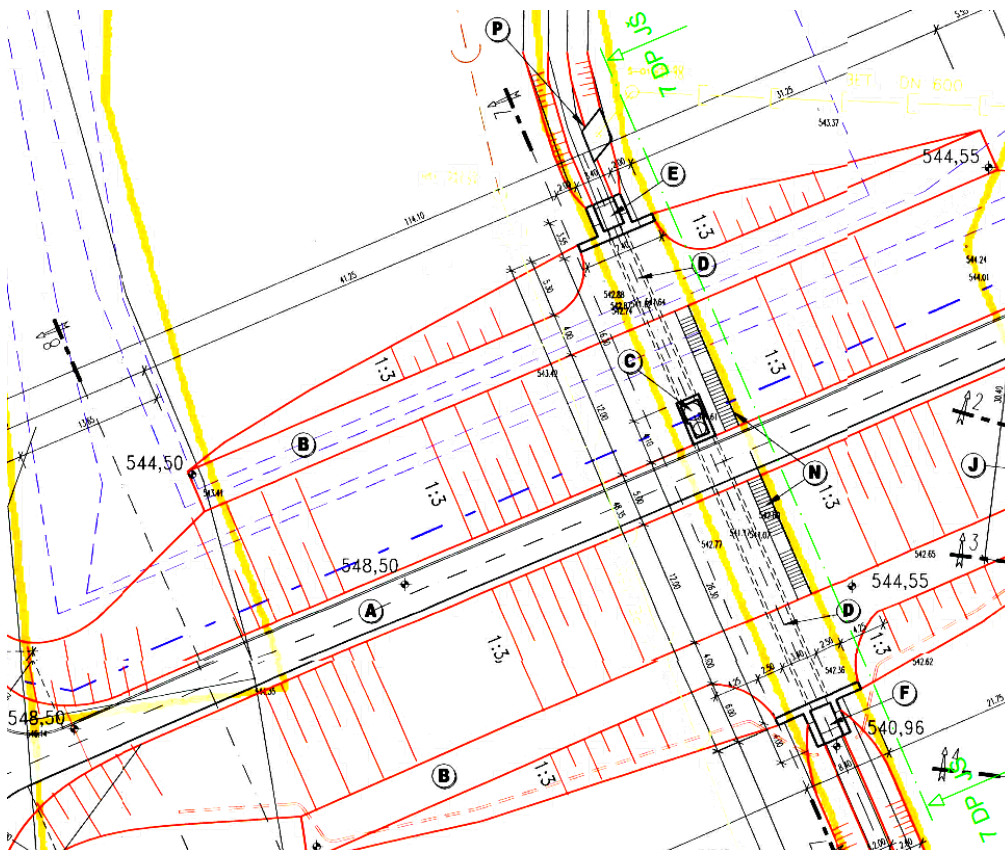
Principem výpočtu FS tedy je opakovaná redukce parametrů c a φ , až do dosažení jejich limitních hodnot, které se projeví divergencí výpočtu a výpočet je v této fázi zastaven.

6. PRŮSAKOVÁ ANALÝZA

Numerická analýza proběhla v programu GEO5-MKP. Analýza proběhla v příčných řezech přehradním tělesem, jednalo se tedy o rovinnou úlohu, kdy velikost průsaku je počítána na 1 metr běžný. Tento přístup je možné aplikovat na liniové stavby, kde podélný rozměr značně přesahuje rozměr příčný, což je v případě hráze SN splněno [10].

6.1 Postup

V projektové dokumentaci [8] jsou k dispozici výkresy dvou příčných řezů (příloha 1). V prvním kroku byl modelován středový (údolní) řez, který se nachází vedle spodní výpusti směrem k levému břehu v linii kontrolních vrtů. Jeho geometrie je uvažována totožná s příčným řezem 7-7 z projektové dokumentace, byť ten leží na opačné straně spodní výpusti (vzdálenost cca 9 m), neboť přesný výkres v linii kontrolních vrtů nebyl součástí projektové dokumentace. Totožnou geometrii modelovaného řezu s řezem 7-7 lze uvažovat na základě tvaru údolí. Pro přehlednost byl tento modelovaný řez označen totožně, jako řez 7-7.

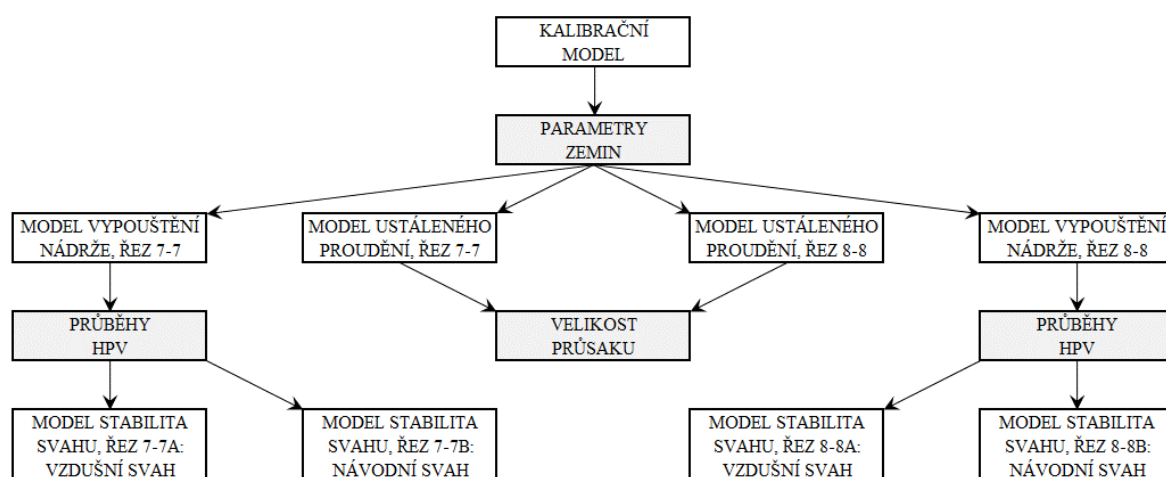


Obrázek 5: Orientační umístění řezů

Na tomto řezu 7-7 byla provedena kalibrace na základě známých hladin v kontrolních vrtech při zkušebním napouštění nádrže, kalibrací byl získán finální soubor vstupních parametrů pro průsakovou analýzu. Ten byl užit v modelu ustáleného proudění a v modelu vypouštění nádrže.

V druhém kroku byl řešen řez 8-8 [8] (příloha 1), který leží při pravém svahu údolí, asi v půli zužující se širší hráze (příloha 2). Parametry materiálů byly převzaty z finálního souboru vstupních parametrů získaného kalibrací. Modelováno bylo opětovně jak ustálené proudění variant zásobních hladin, tak vypouštění nádrže.

Průběh hladiny vody získaný ze simulace poklesu hladiny při vypouštění nádrže byl užit v deformační analýze. Přehledně postup práce a souvztažnost mezi modely zobrazuje následující schéma:



Obrázek 6: Schéma užitého postupu

6.2 Konvergence výpočtu a časová náročnost

Při zadání příliš složité geometrie, nebo nesprávným nastavením generace sítě konečných prvků či velkých hodnotách některých parametrů, nemusí v programu GEO5-MKP (jako ostatně i v jiných programech) výpočet konvergovat. Obdobně opakovaně nastávala situace, že výpočet sice šel ke konvergenci, ale na užití výpočetní technice trval neúměrně dlouhou dobu (pokud například bylo měřítko času modelování k času modelovanému 5:1, bylo by zapotřebí zhruba jednoho měsíce k otestování jednoho souboru vstupních parametrů, což značně přesahuje rozsah práce). Autor tak musel vždy volit střední cestu mezi co nejpřesnější aproximací reality a možnostmi užití výpočetní techniky a programu.

6.3 Kalibrace

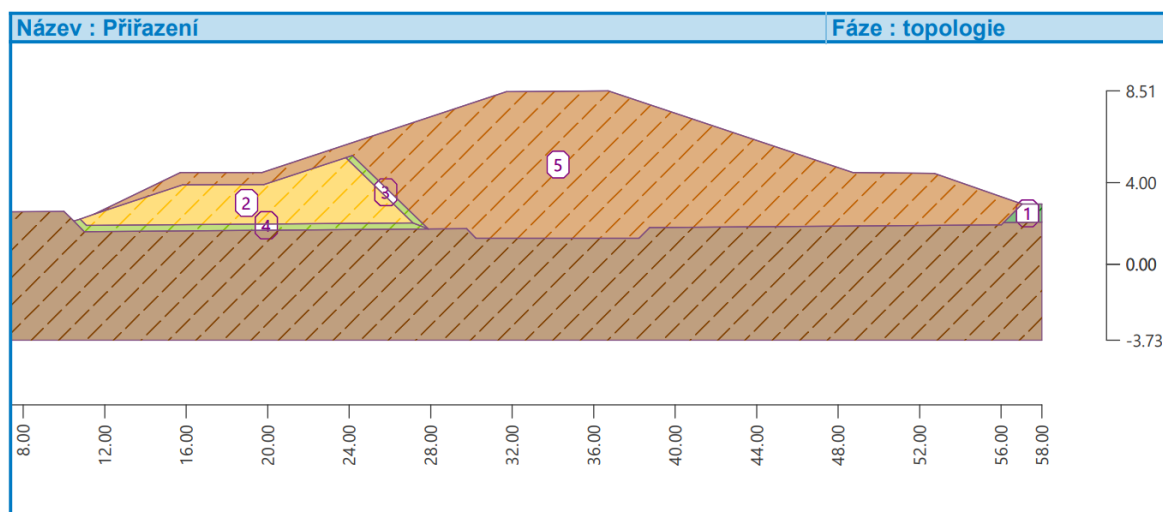
Model byl kalibrován z hlediska polohy hladiny podzemní vody (pórových tlaků) dle známých hladin v kontrolních vrtech při zkušebním napouštění nádrže v období 15.4.2009 – 3.5.2009. Z hlediska režimu proudění vody se jedná o neustálené proudění, a tak byl také výpočet proveden.



Obrázek 7: Zkušební napouštění SN, zdroj: [7], 17.4.2009

6.3.1 Topologie kalibračního modelu

Geometrie modelu vznikla přerýsováním příčného řezu 7-7 (příloha 1) v programu AUTOCAD a následnou konverzí do formátu DXF, který program GEO5-MKP umožňuje vložit jako šablonu pro zadávání bodů jednotlivých rozhraní.



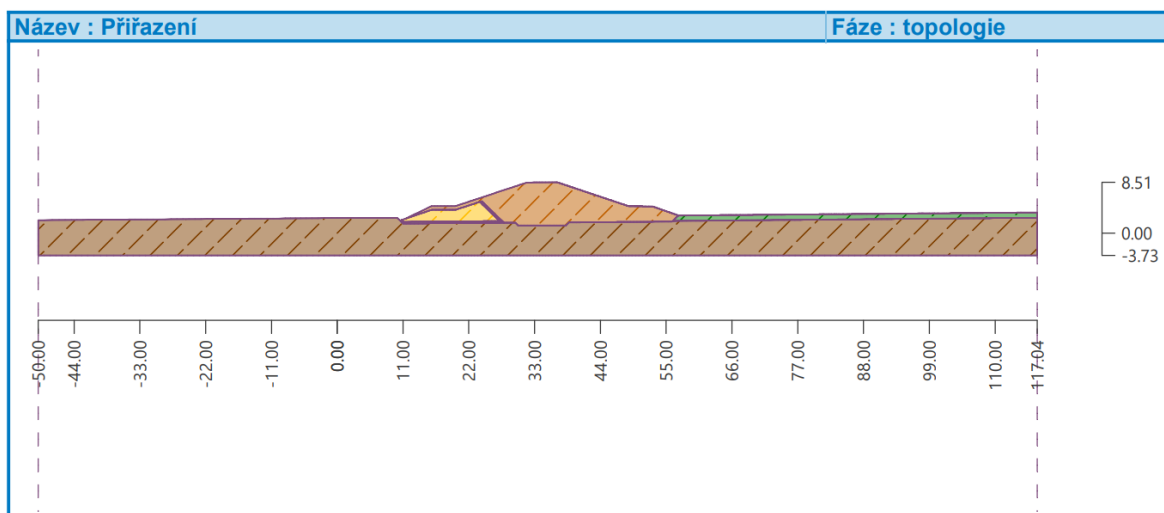
Obrázek 8: Materiály modelu

Záměrně nebyly modelovány prvky komunikace (asfaltobetonová vrstva, podkladní vrstva kameniva), protože z hlediska průsaku by hrály zanedbatelnou (či spíše žádnou) roli a zbytečně zvyšovaly náročnost výpočtu. Stejně tak nebyly modelovány vrstvy při obou svazích – humusování s osetím, protierozní prostorová matrace Enkamat a šterkopískový filtr při návodním svahu. Vzhledem k tloušťce těchto vrstev je oprávněný předpoklad, že nebudou mít výrazný dopad na velikost průsaku a tvar depresní křivky při dlouhodobém zaplnění nádrže, který odpovídá ustálenému stavu.

Model je tedy složen z šesti oblastí a 5 materiálů – oblasti 1 byl přiřazen materiál méně propustných zemín F3/MS (tmavě zelená), který u návodní paty předpokládá projektová dokumentace, oblasti 6 (tmavě hnědá) materiál hutněné pláně S3/S-F-G3/G-F, oblasti 5 (světle hnědá) samotný materiál hráze S4/SM, oblastem 3 a 4 (světle zelená) materiál šterkopískového filtru G3/G-F a oblasti 2 (žlutá) materiál šterkového drenážního násypu (frakce 8-32).

Z hlediska materiálu podložních vrstev bylo přistoupeno k homogenizaci. Dle inženýrskogeologického průzkumu [14] jsou podkladní vrstvy tvořeny převážně zeminou G3/G-F a S3/S-F, které mají dle ČSN 75 2410 značný průnik v předpokládaném rozsahu koeficientu nasycené hydraulické vodivosti K_{sat} jakožto zásadního materiálového parametru. Vzhledem k tomu, že vrtý v rámci IGP nejsou umístěny v prostoru modelovaného řezu (který musí být z důvodu možnosti kalibrace veden v linii kontrolních vrtů TBD) bylo by modelování jednotlivých vrstev pouze dohadem a pravděpodobně by realitu aproximovalo stejně nepřesně jako užitá homogenizace.

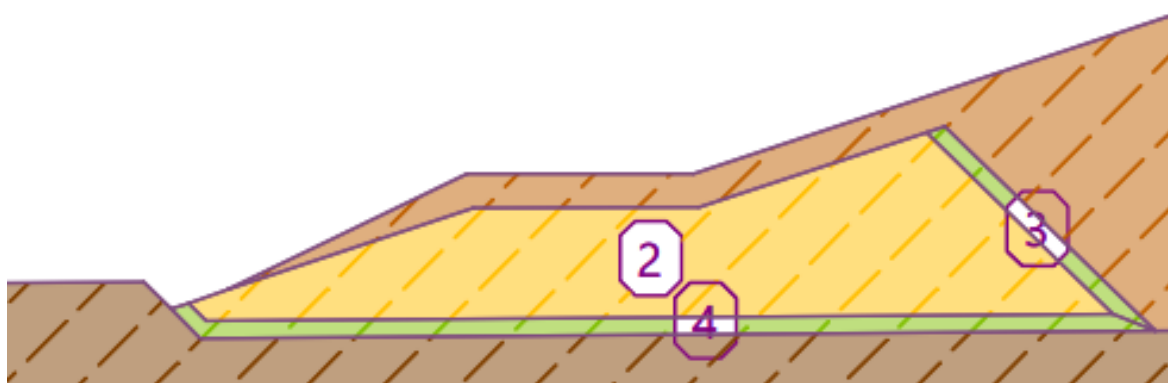
Aby nedocházelo k ovlivnění výsledků zaplněním prostoru modelu vodou, bylo přistoupeno k rozšíření modelovaného prostoru o 60 metrů od vzdušní i návodní paty. Celý modelovaný prostor tedy vypadá následovně:



Obrázek 9: Kalibrační model

Souřadný systém v modelu byl zaveden tak, že bod $[0,0]$ leží ve vzdálenosti 10 m od vzdušní paty hráze ve výšce 540 m n.m., což je výška zavedené srovnávací hladiny umožňující snadnou orientaci při porovnávání hladin měřených a vypočtených v rámci kalibrace.

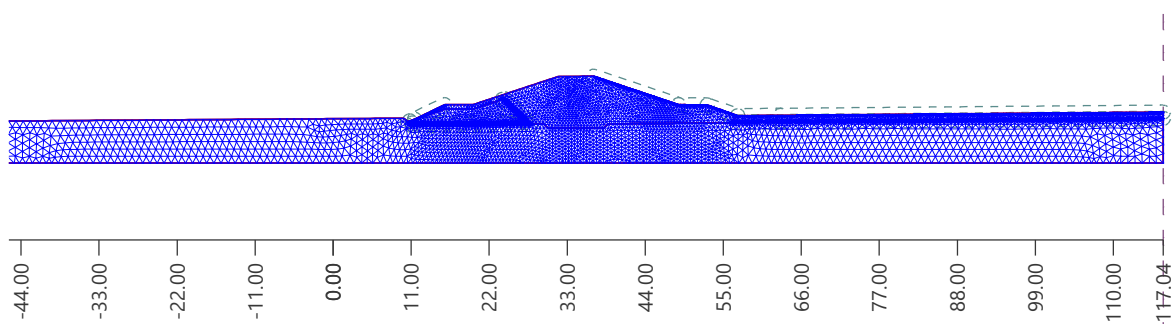
Záměrně byla pokřivena linie svahu mezi vzdušní patou a přítěžovací lavicí na vzdušném svahu tak, aby odtok nebyl “bržděn” vrstvou materiálu hráze. Funkce patního drénu a svodného potrubí byla simulována přeneseně průsakovou podmínkou na styku obnaženého štěrkového drenážního násypu a volným prostorem.



Obrázek 10: Simulace drenáže

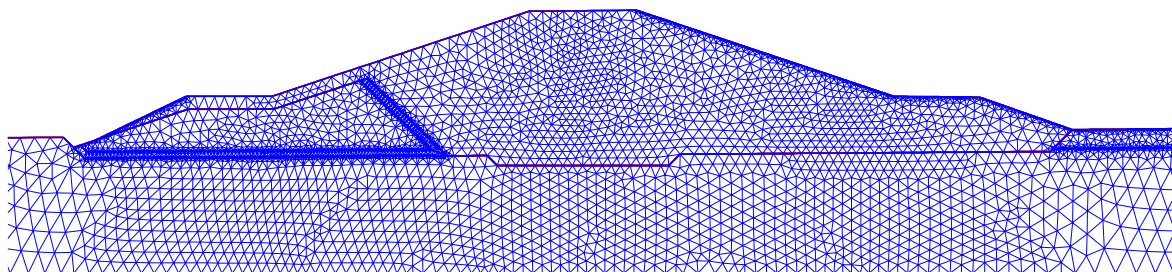
6.3.2 Síť konečných prvků

Program GEO5-MKP umožňuje zadat délku hrany prvku globálně a velikost hrany prvku upravovat lokálně pomocí nástrojů “Zahuštění bodů”, “Zahuštění linií” a “Vlnná zahuštění”. Po optimalizaci byla výsledná síť konečných prvků zadána takto: základní délka hrany prvku je 1 m a pomocí vlnných zahuštění zmenšena v prostoru přehradního tělesa a pod ním na 0,4 m, pomocí zahuštění linií zmenšena délka hrany prvku na návodním líci a na rozhraních materiálů na 0,05 m. Generovány byly trojúhelníkové prvky za použití zabudovaného algoritmu “Vyhlazovat síť”. Tím byla vytvořena síť o počtu prvků 35 862 s 19 040 uzly.



Obrázek 11: Síť konečných prvků

Počet prvků a uzlů má zásadní dopad na přesnost výsledků, ale rovněž na časovou náročnost a v určitých případech i na konvergenci výpočtů. Popsaná síť vznikla nutností malé délky prvku na návodním líci pro konvergenci výpočtu při zadávání malých změn tlaků v jednotlivých fázích, dostatečně přesným řešením v oblasti hráze, a naopak zmírněním počtu uzlů v prostorech před a za hrází, kde výsledky není podle čeho kalibrovat a jako takové nejsou předmětem DP.



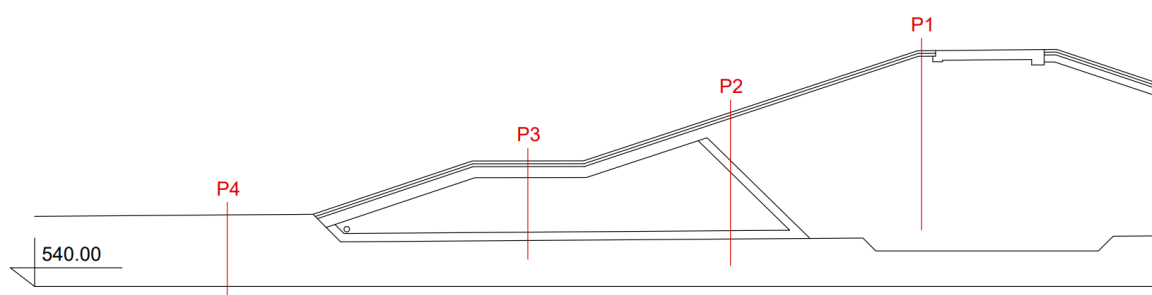
Obrázek 12: Síť konečných prvků – zahuštění

6.3.3 Kontrolní vrty

Přesná poloha kontrolních vrtů není v PD zaznamenána. Poloha vrtů byla odvozena na základě poznámky „V prostoru tělesa hráze a v podhráží – 4 pozorovací vrty – na koruně hráze, uprostřed vzdušního svahu, na vzdušní patě hráze a v podhráží“ [9] a zejména pak na základě fotodokumentace zájmové oblasti. Takto určené polohy byly ještě zkontrolovány na letecké mapě dostupné na [2], v rámci možné přesnosti takové kontroly byla lokalizace kontrolních vrtů uvažována za úspěšnou.



Obrázek 13: Poloha kontrolních vrtů, autor: Martin Hladík, 26.9.2018

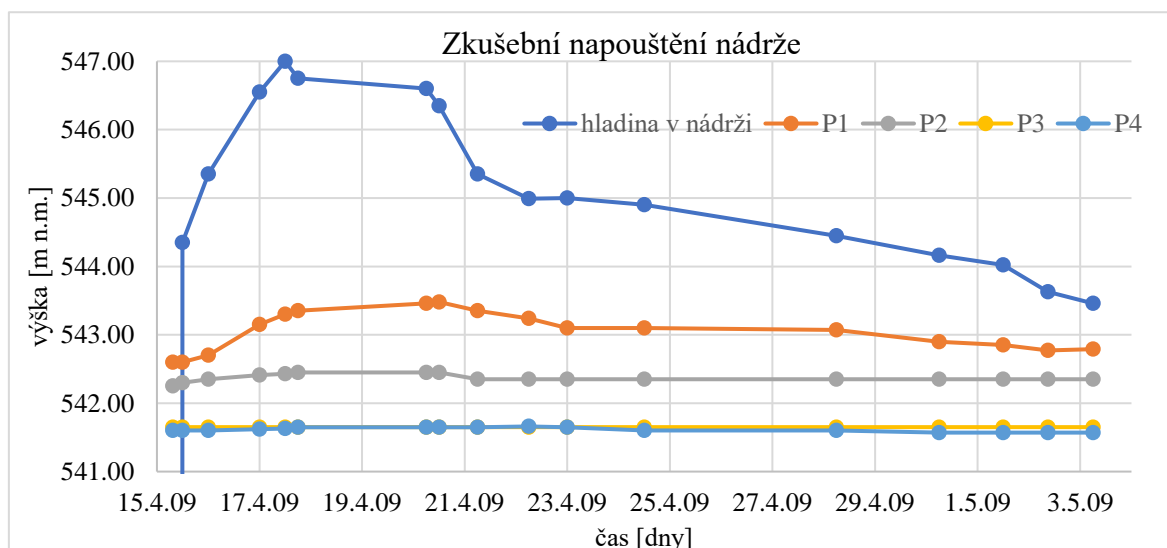


Obrázek 14: Schéma umístění vrtů v příčném řezu

Kontrolní vrty nesou označení P1, P2, P3 a P4. Do modelu byly zasazeny monitory pórového tlaku, které svojí polohou na ose x odpovídají polohám kontrolních vrtů, ve svislém směru jsou umístěny na srovnávací hladinu 540 m n.m.

6.3.4 Kalibrační graf a časové fáze modelu

Graf napouštění z [9] byl lineárně aproximován a převeden do programu EXCEL. Dokumentuje výšku hladiny vody v nádrži a v kontrolních vrtech v průběhu zkušební napouštění a části vypouštění.



Graf 2: Hladina vody v nádrži a ve vrtech při zkušebním napouštění

Úseky mezi jednotlivými body grafu určují délku každé fáze v modelu a příslušnou změnu v podmínce pórového tlaku na návodním líci hráze. Prakticky však bylo zapotřebí některé fáze rozdělit na menší výpočetní fáze (mezifáze), aby výpočet konvergoval. K divergenci výpočtu dochází zpravidla při velkých nárůstech, respektive poklesech pórového tlaku v rámci jedné fáze. Toto dělení bylo provedeno tak, aby byl dodržen vývoj hladiny v nádrži, jinými slovy, fáze byla v případě potřeby rozdělena najitím bodu na přímce hladiny v nádrži této fázi příslušející. Počty mezifází bylo zapotřebí operativně měnit pro jednotlivé soubory vstupních parametrů.

Testování jednotlivých vstupních parametrů bylo provedeno na simulaci období 15.4.2009 7:30 – 20.4.2009 12:00, v tomto období hladina vystoupá na kótu bezpečnostního přelivu 547 m n.m. a při následném vypouštění klesne na kótu 546,35 m n.m.

Toto období bylo modelováno s posledním souborem vstupních parametrů pomocí 15 fází (uvedeny jsou i měřené hodnoty hladin v jednotlivých vrtech a hladiny v nádrži – v metrech nad srovnávací rovinou 540 m n.m.):

Tabulka 2: Časové fáze kalibračního modelu

fáze	1	2	3	4	5	6	7
trvání fáze [den]	0.00	0.1875	0.5	1	0.5	0.1	0.1
hodin od počátku [h]	0.00	4.5	16.5	40.5	52.5		
dne od počátku [den]	0	0.1875	0.6875	1.6875	2.1875		
datum	15.4.09 7:30	15.4.09 12:00	16.4.09 0:00	17.4.09 0:00	17.4.09 12:00		
hladina [m n. SR]	není	4.35	5.35	6.55	7.00	6.90	6.80
P1 [m n. SR]	2.60	2.60	2.70	3.15	3.30		
P2 [m n. SR]	2.25	2.30	2.35	2.41	2.43		
P3 [m n. SR]	1.65	1.65	1.65	1.65	1.65		
P4 [m n. SR]	1.60	1.60	1.60	1.62	1.63		
fáze	8	9	10	11	12	13	14
trvání fáze [den]	0.05	0.5	2	0.1	0.05	0.05	0.05
hodin od počátku [h]	58.5		118.5				124.5
dne od počátku [den]	2.4375		4.9375				5.1875
datum	17.4.09 18:00		20.4.09 6:00				20.4.09 12:00
hladina [m n. SR]	6.75	6.72	6.60	6.50	6.45	6.40	6.35
P1 [m n. SR]	3.35		3.46				3.48
P2 [m n. SR]	2.45		2.45				2.45
P3 [m n. SR]	1.65		1.65				1.65
P4 [m n. SR]	1.65		1.65				1.65

6.3.5 Počáteční a okrajové podmínky

Počáteční podmínkou byla známá poloha hladiny podzemní vody v kontrolních vrtech na začátku kalibračního období (před začátkem napouštění nádrže). Pro kontrolu byly tyto hladiny srovnány s měřením provedeným 18.12.2007 [3]:

Tabulka 3: Porovnání hladin ve vrtech

vert	hladina 18.12.2007	hladina 15.4.2009
	[m n.m.]	[m n.m.]
P1	542.57	542.60
P2	542.18	542.25
P3	541.51	541.65
P4	541.10	541.60

Z tabulky je zřejmé, že rozdíly nejsou velké, a tudíž bylo lze vyvozovat, že hladiny ve vrtech měřených 15.4.2009 ještě nejsou ovlivněné napouštěním nádrže a těchto hladin bylo užito k zadání počáteční podmínky pomocí HPV v 1. fázi modelu.

vodítkem byly rozsahy koeficientu nasycené hydraulické vodivosti převzaté z ČSN 75 2410 [15], předpokládaný rozsah materiálu hráze pak udává též IGP [14]:

Tabulka 4: Předpokládané rozsahy vodivosti

	MIN K_{sat}	MAX K_{sat}
materiál	[m/den]	[m/den]
materiál hráze - písčitohlinitá S4/SM dle IGP	8.640E-04	27.648
materiál hráze - písčitohlinitá S4/SM dle normy	8.640E-06	0.864
méně propustné zeminy F3/MS - hlinitopísčité	8.640E-06	0.864
hutněná pláň S3/S-F	8.640E-03	0.864
šterkopiskový filtr G3/G-F	4.320E-03	0.0864

Kalibrace proběhla v jedenácti krocích (testováno bylo 11 souborů vstupních parametrů), správnost každého souboru byla vyhodnocována metodou nejmenších čtverců a zároveň přihlédnutím k vývoji hladiny ve vrtu P1 v grafu, neboť hladina v tomto vrtu má nejsilnější odezvu na vývoj hladiny v nádrži. Proto byl nakonec vybrán za nejbližší realitě soubor číslo 11, byť má matematicky nepatrně větší chybovost:

Tabulka 5: Zhodnocení souborů vstupních parametrů

soubor parametrů	1	4	5	6	8	9	10	11
suma rozdílů ²	5.00	4.72	4.89	4.79	5.10	5.24	3.36	3.47

Tabulka neuvádí soubory 2,3 a 7, neboť ty nebyly pro jejich zřejmou chybovost testovány v rozsahu celého kalibračního období.

Pro ilustraci změn v parametrech poslouží porovnání souboru vstupních parametrů 1 a finálního souboru vstupních parametrů 11:

Tabulka 6: Soubor vstupních parametrů 1

soubor vstupních parametrů 1	$K_{sat,x}$	$K_{sat,z}$	e_0	α	n	S_r	λ
materiál	[m/den]	[m/den]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
materiál hráze - písčitohlinitá S4/SM	0.864	0.0432	0.7	7.5	1.89	0.16	20
méně propustné zeminy F3/MS - hlinitopísčité	0.01	0.01	0.7	12.4	2.28	0.14	1
hutněná pláň S3/S-F	0.029	0.0058	0.61	2.7	1.23	0.26	5
šterkový drenážní násyp	1	1	0.75	a=0.1	b=0.1	0.11	1
šterkopiskový filtr G3/G-F	0.1	0.1	0.7	3.8	1.01	0.15	1

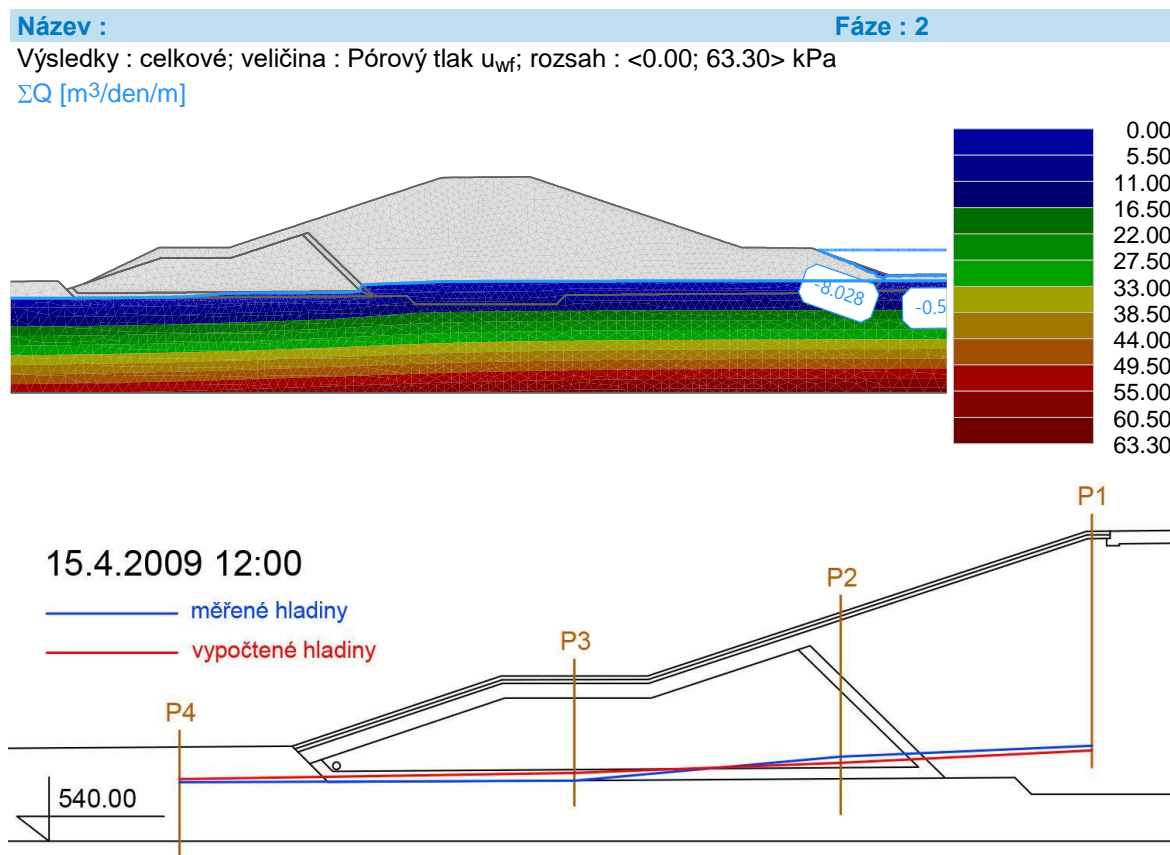
Tabulka 7: Výsledný soubor vstupních parametrů 11

soubor vstupních parametrů 11	$K_{sat,x}$	$K_{sat,z}$	e_0	α	n	S_r	λ
materiál	[m/den]	[m/den]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
materiál hráze - písčitohlinitá S4/SM	1.8	0.09	0.7	7.5	1.89	0.16	20
méně propustné zeminy F3/MS - hlinitopísčité	0.005	0.005	0.7	12.4	2.28	0.14	1
lutěná pláň S3/S-F	0.01	0.002	0.61	2.7	1.23	0.26	5
šterkový drenážní násyp	3	3	0.75	a=0.1	b=0.1	0.11	1
šterkopiskový filtr G3/G-F	0.0864	0.0864	0.7	3.8	1.01	0.15	1

6.3.7 Výsledky kalibrace

Výsledný soubor parametrů 11 dosáhl průměrného rozdílu mezi vypočtenou a měřenou hodnotou 0,27 m a maximálního rozdílu 0,84 m.

Průběhy hladin dle modelu (veličina pórový tlak) a porovnání měřených a vypočtených hladin ve vrtech dokumentují ve vybraných časech následující obrázky:

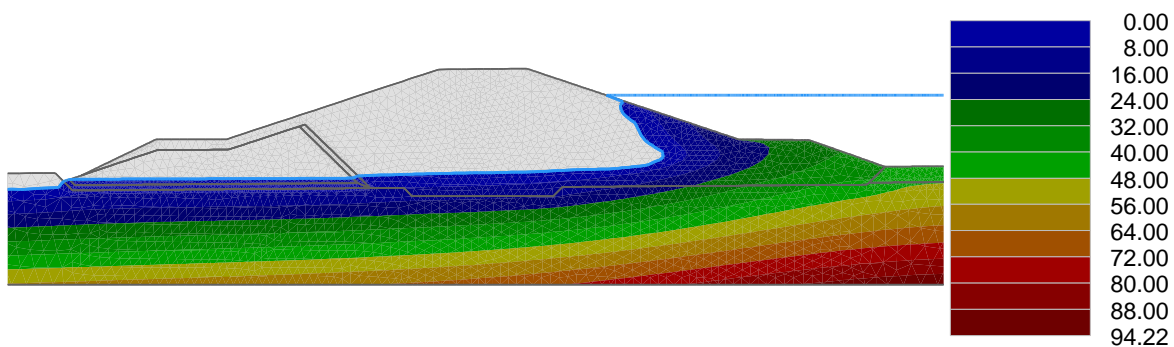


Obrázek 17: Porovnání vypočtených a měřených hladin 15.4.

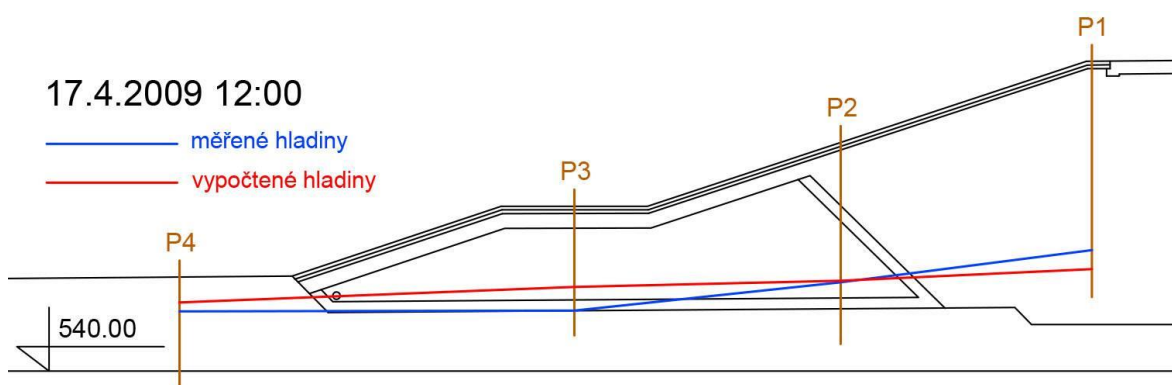
Název :

Fáze : 5

Výsledky : celkové; veličina : Pórový tlak u_{wf} ; rozsah : <0.00; 94.22> kPa



17.4.2009 12:00

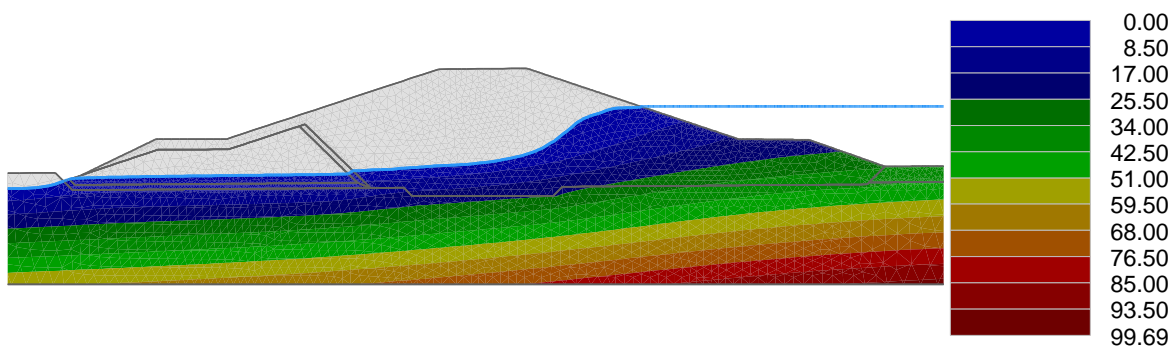


Obrázek 18: Porovnání vypočtených a měřených hladin 17.4.2009

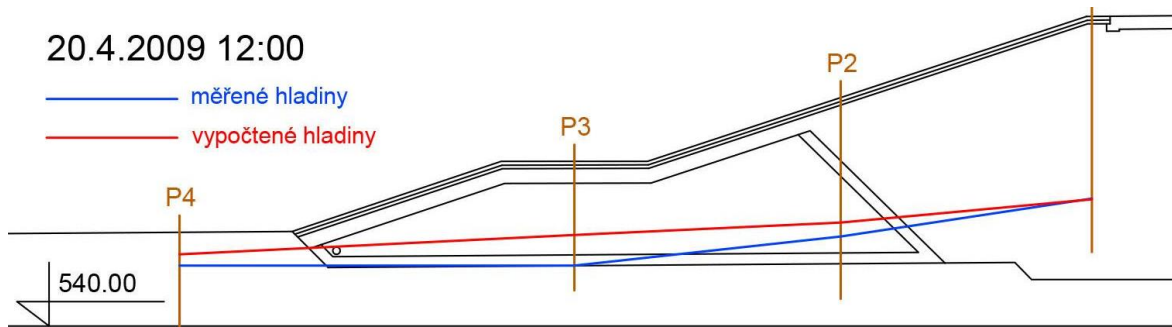
Název :

Fáze : 14

Výsledky : celkové; veličina : Pórový tlak u_{wf} ; rozsah : <0.00; 99.69> kPa



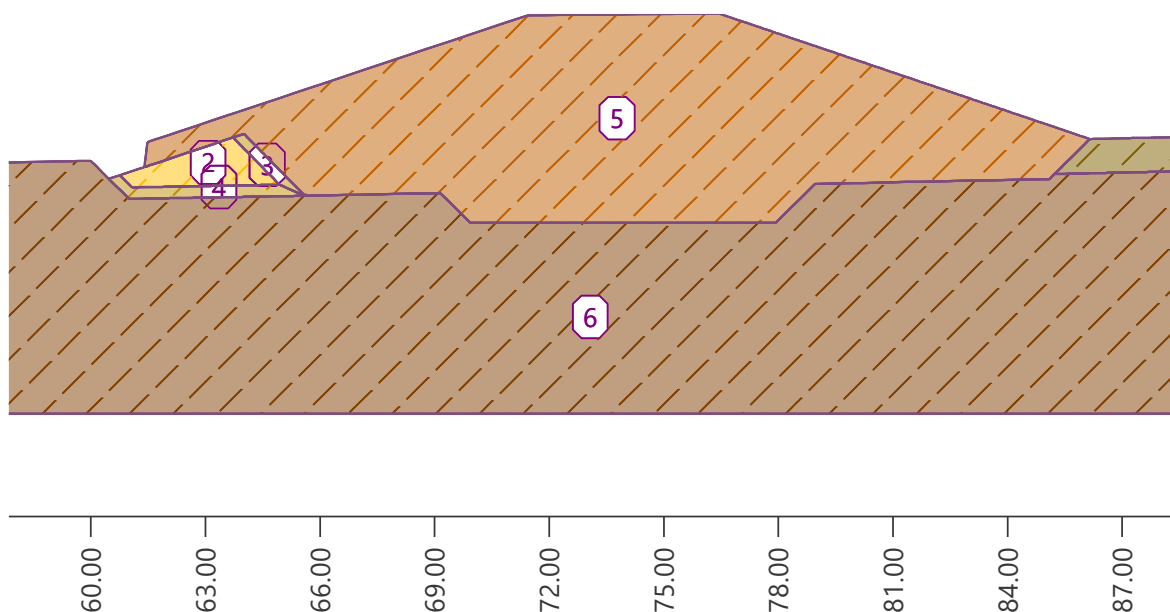
20.4.2009 12:00



Obrázek 19: Porovnání vypočtených a měřených hladin 20.4.2009

6.4 Řez 8-8

Menší řez 8-8 byl řešen obdobným způsobem jako řez 7-7. Parametry materiálů byly převzaty z výsledků kalibrace (výsledný soubor vstupních parametrů 11). V řezu 8-8 bylo modelováno ustálené proudění pro navrhované zásobní hladiny vody v nádrži a hladinu maximální a průběh vypouštění nádrže (kapitola 6.6).



Obrázek 20: Model řezu 8-8

6.5 Velikost průsaku tělesem hráze

Velikost průsaku byla vyhodnocena pro dvě navrhované varianty zásobní hladiny v [6], tedy pro zásobní hladinu na kótě bezpečnostního přelivu 547 m n.m. a 544,55 m n.m., a pro maximální hladinu 584,2 m n.m. V případě varianty nižší zásobní hladiny je tato hladina pod návodní patou v řezu 8-8 a tak byl zjednodušeně přisouzen nulový průsak zužujícím se částem hráze. Z celkové délky hráze 114 m byla řezu 7-7 přisouzena oblast délky 85,75 m a řezu 8-8 28,25 m.

Tabulka 8: Velikost průsaku

hladina	průsak řezem 7-7	průsak řezem 8-8	průsak oblasti řezu 7-7	průsak oblasti řezu 8-8
[m n.m.]	[m ² /den]	[m ² /den]	[m ³ /den]	[m ³ /den]
547	0.716	0.348	61.40	9.83
544.55	0.194	0	16.64	0.00
548.2	1.158	0.734	99.30	20.74
hladina	celkový průsak	celkový průsak	celkový průsak	
[m n.m.]	[m ³ /den]	[m ³ /s]	[l/s]	
547	71.23	0.00082	0.82	
544.55	16.64	0.00019	0.19	
548.2	120.03	0.00139	1.39	

6.6 Simulace vypouštění

Rychlý pokles hladiny vody v nádrži vyvolává v konstrukci nepříznivé účinky vody. Proto byl simulován pokles hladiny v nádrži a vypočítané průběhy hladiny užity v deformační analýze.

Byl předpokládán maximální odtok spodní výpustí, a tedy nejrychlejší možné vypouštění nádrže, které je z hlediska stability konstrukce nejméně příznivé. K takovému průběhu vypouštění by mohlo dojít například při předvypouštění v rámci náhlé povodně. Časový průběh vypouštění (závislost výšky hladiny v nádrži a času) byl vypočten prokřížením konzumční křivky spodní nádrže a čáry zatopených objemů.

6.6.1 Konzumční křivka SV

Konzumční křivka je v tabelární formě uvedená v technické zprávě projektové dokumentace [1] takto:

Tabulka 9: Konzumční křivka SV

H	Q
[m]	[m ³ /s]
2	4.92
3	6.03
4	6.96
5	7.78
6	8.52
6.75	9.04

Byl uvažován hydraulický jev výtok malým otvorem [6], při kterém je průtok definován jako:

$$Q = \mu_v S \sqrt{2gz}$$

Kde Q označuje průtok, μ_v výtokový součinitel, S plochu otvoru spodní výpusti, g tíhové zrychlení a z vzdálenost těžiště otvoru od hladiny. Výtokový součinitel byl optimalizován metodou nejmenších čtverců tak, aby se vypočtené hodnoty Q co nejvíce přiblížili hodnotám z předešlé Tabulky 3. Tímto způsobem mu byla přisouzena hodnota $\mu_v = 0,746$ [-].

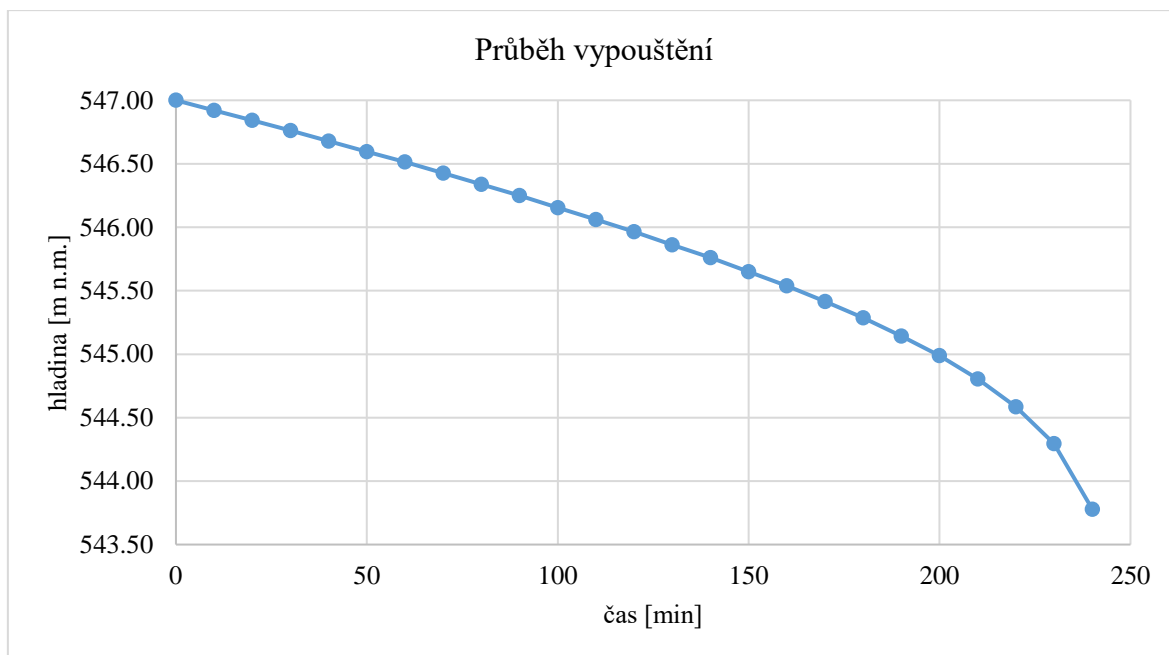
6.6.2 Průběh vypouštění

Počáteční výškou průběhu vypouštění je úroveň zásobní hladiny, navrhované v [6] na kótě bezpečnostního přelivu, tedy 547 m n.m. Pro tuto výšku byl stanoven objem vody v nádrži dle čáry zatopených objemů (viz Graf 1) a spočten průtok dle rovnice uvedené v 6.6.1. Následně byl zaveden časový krok (10 min), ve kterém byl uvažován průtok konstantní. Byl vypočten objem odtoku za tento časový krok a tento byl odečten od původního objemu vody v nádrži, z čáry zatopených ploch a objemů byla novému objemu lineární interpolací přisouzena kóta hladiny vody v nádrži. Obdobně byl výpočet proveden v každém dalším časovém kroku (řádku následující tabulky):

Tabulka 10: Průběh vypouštění

čas od počátku	časový krok	výška hladiny	objem	průtok Q
[min]	[min]	[m n.m.]	[m ³]	[m ³ /s]
0	0	547.00	106834	8.32
10	10	546.92	101839	8.26
20	10	546.84	96884	8.19
30	10	546.76	91970	8.12
40	10	546.68	87096	8.05
50	10	546.60	82265	7.98
60	10	546.51	77478	7.91
70	10	546.43	72734	7.83
80	10	546.34	68038	7.75
90	10	546.25	63388	7.67
100	10	546.15	58787	7.58
110	10	546.06	54237	7.50
120	10	545.96	49740	7.40
130	10	545.86	45297	7.31
140	10	545.76	40913	7.21
150	10	545.65	36586	7.10
160	10	545.54	32325	6.99
170	10	545.42	28130	6.87
180	10	545.29	24010	6.74
190	10	545.14	19969	6.58
200	10	544.99	16019	6.42
210	10	544.80	12167	6.21
220	10	544.58	8439	5.96
230	10	544.29	4862	5.61
240	10	543.78	1494	4.93

Tímto byly určeny základní časové fáze modelu vypouštění nádrže, ale obdobně jako v případě kalibračního modelu bylo zapotřebí vkládat lineárně interpolované mezifáze k zajištění stability výpočtu.



Graf 3: Průběh vypouštění

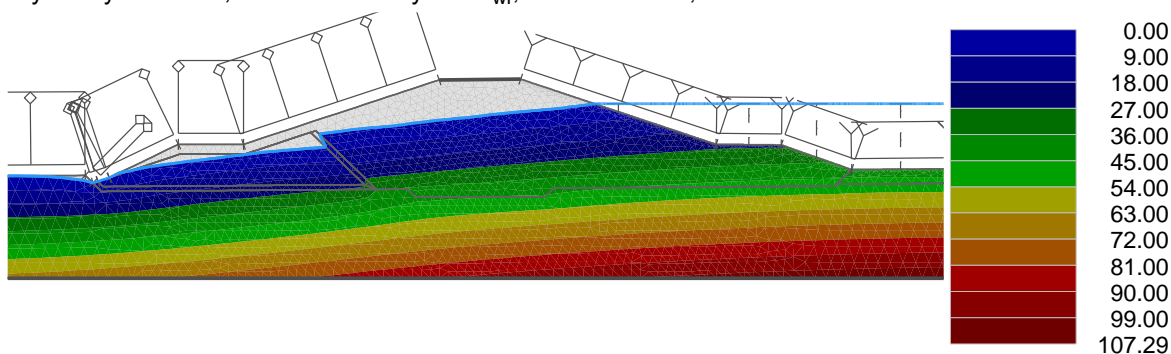
6.6.3 Model vypouštění

Geometrie modelů vypouštění byla totožná jako v případě kalibračního modelu v řezu 7-7, respektive modelu ustáleného proudění řezu 8-8. Obdobně byly stanoveny i okrajové podmínky. Počáteční podmínka (1.fáze) byla určena výpočtem ustáleného proudění s hladinou vody v nádrži na úrovni zásobní hladiny (547 m n.m. – kóta bezpečnostního přelivu).

Vývoj hladiny v tělese v intervalu 30 min (hladiny užité ve stabilitní analýze) dokumentují následující výstupy z numerického modelování (veličina pórový tlak), v popisku vždy uvedeno číslo fáze, čas od počátku vypouštění a kóta hladiny vody v nádrži.

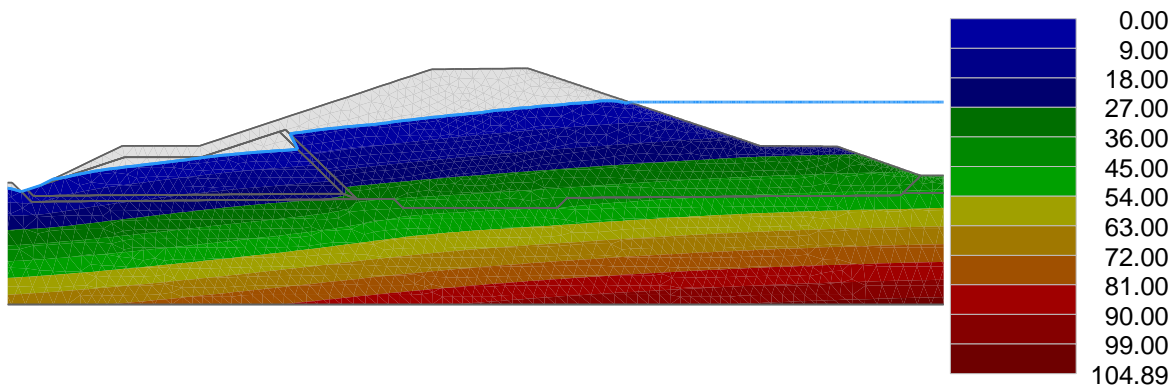
Pro řez 7-7:

Výsledky : celkové; veličina : Pórový tlak u_{wf} ; rozsah : <0.00; 107.29> kPa



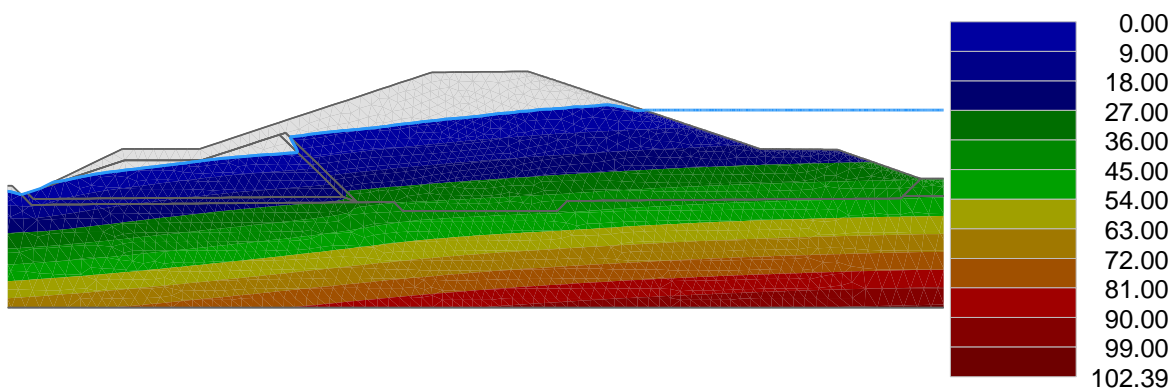
Obrázek 21: Fáze 1 - čas: 0 min, hladina: 547 m n.m.

Výsledky : celkové; veličina : Pórový tlak u_{wf} ; rozsah : <0.00; 104.89> kPa



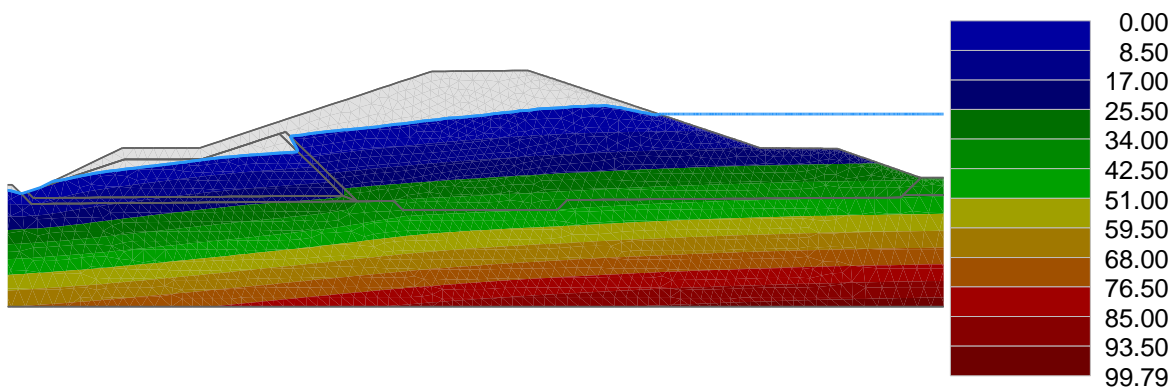
Obrázek 22: Fáze 5 - čas: 30 min, hladina: 546,76 m n.m.

Výsledky : celkové; veličina : Pórový tlak u_{wf} ; rozsah : <0.00; 102.39> kPa



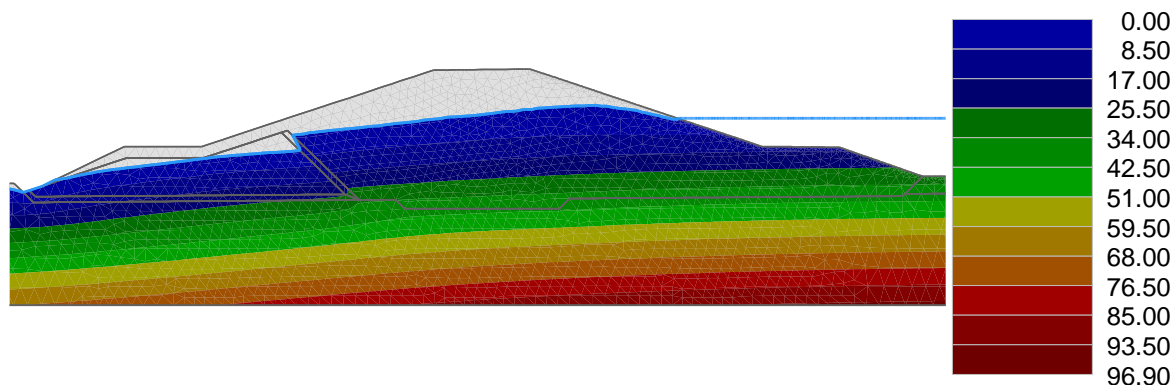
Obrázek 23: Fáze 8 - čas: 60 min, hladina: 546.51 m n.m.

Výsledky : celkové; veličina : Pórový tlak u_{wf} ; rozsah : <0.00; 99.79> kPa



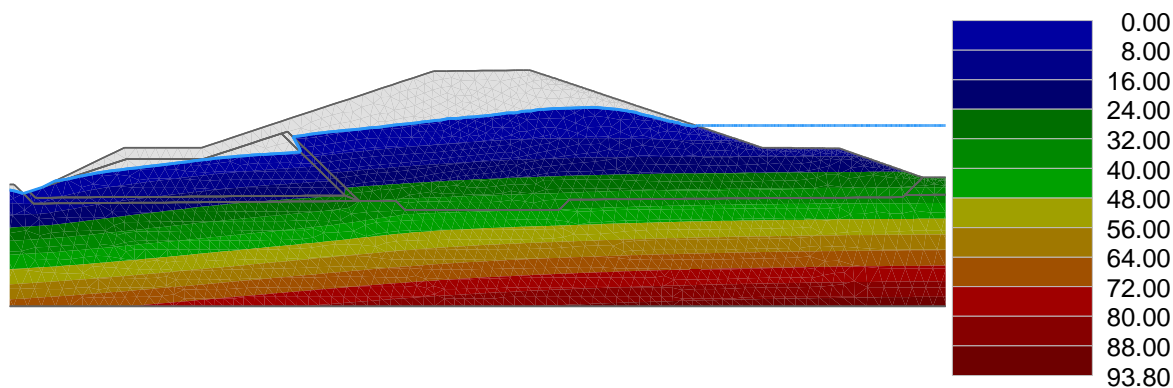
Obrázek 24: Fáze 11 - čas: 90 min, hladina: 546,25 m n.m.

Výsledky : celkové; veličina : Pórový tlak u_{wf} ; rozsah : <0.00; 96.90> kPa



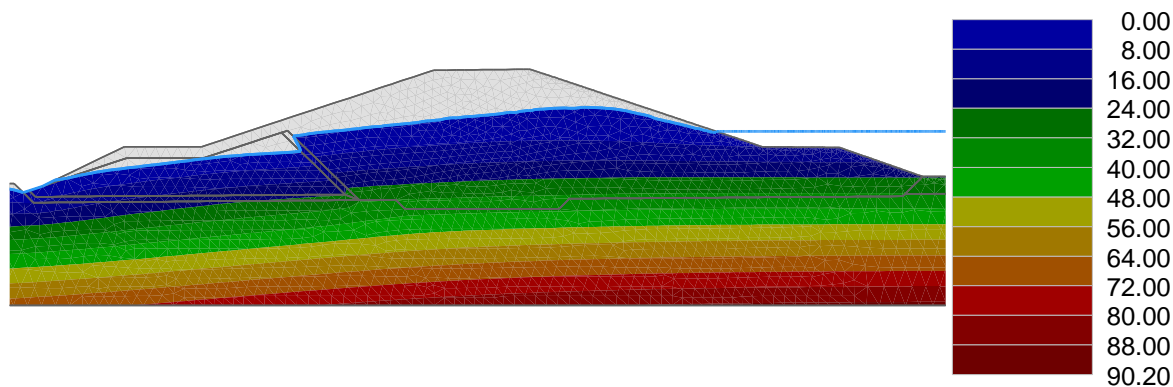
Obrázek 25: Fáze 14 - čas: 120 min, hladina: 545,96 m n.m.

Výsledky : celkové; veličina : Pórový tlak u_{wf} ; rozsah : <0.00; 93.80> kPa



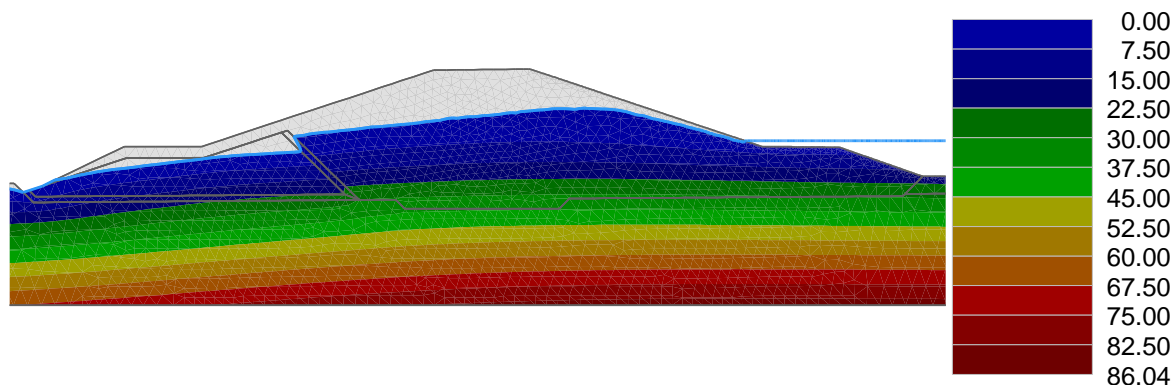
Obrázek 26: Fáze 17 - čas: 150 min, hladina: 545,65 m n.m.

Výsledky : celkové; veličina : Pórový tlak u_{wf} ; rozsah : <0.00; 90.20> kPa



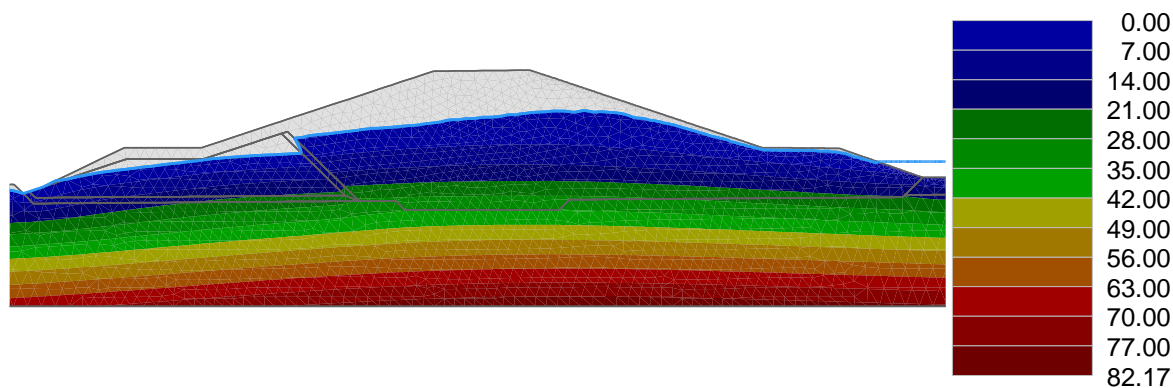
Obrázek 27: Fáze 23 - čas: 180 min, hladina: 545,29 m n.m.

Výsledky : celkové; veličina : Pórový tlak u_{wf} ; rozsah : <0.00; 86.04> kPa



Obrázek 28: Fáze 26 - čas: 210 min, hladina: 544,80 m n.m.

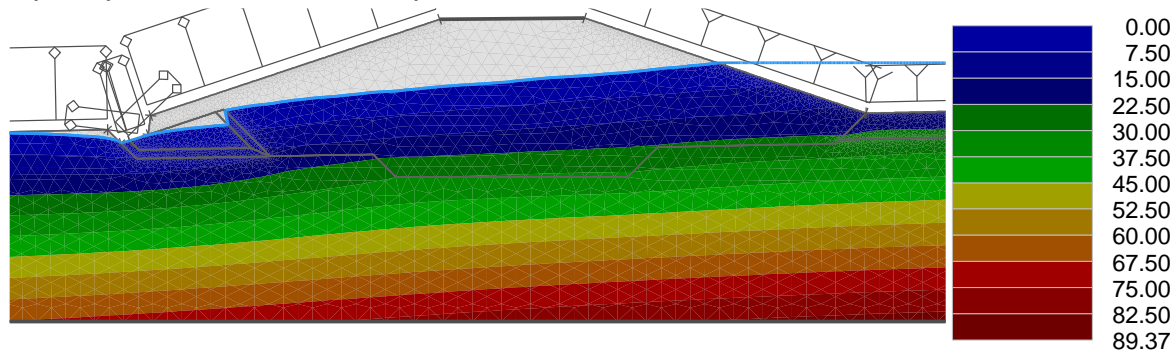
Výsledky : celkové; veličina : Pórový tlak u_{wf} ; rozsah : <0.00; 82.17> kPa



Obrázek 29: Fáze 36 - čas: 240 min, hladina: 543,78 m n.m.

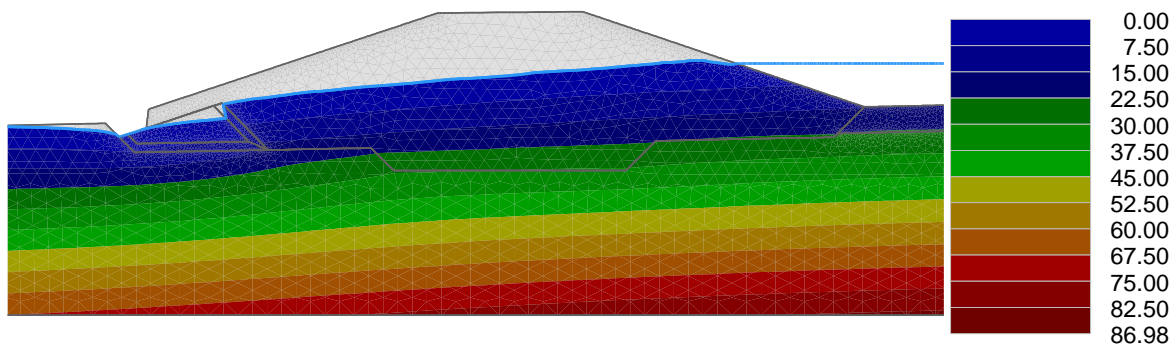
Pro řez 8-8:

Výsledky : celkové; veličina : Pórový tlak u_{wf} ; rozsah : <0.00; 89.37> kPa



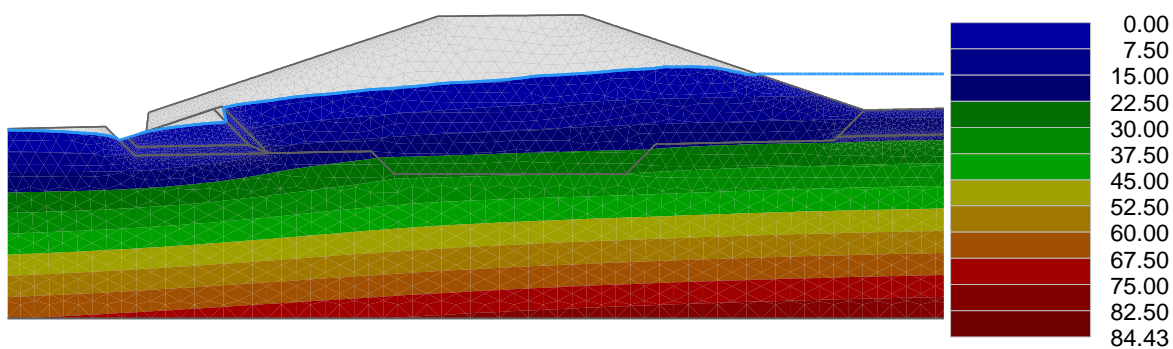
Obrázek 30: Fáze 1 - čas: 0 min, hladina: 547 m n.m.

Výsledky : celkové; veličina : Pórový tlak u_{wf} ; rozsah : <0.00; 86.98> kPa



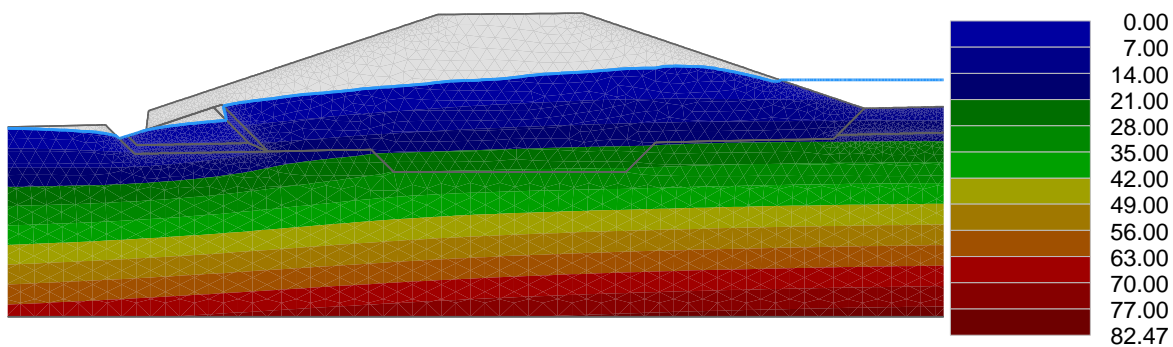
Obrázek 31: Fáze 5 - čas: 30 min, hladina: 546,76 m n.m.

Výsledky : celkové; veličina : Pórový tlak u_{wf} ; rozsah : <0.00; 84.43> kPa



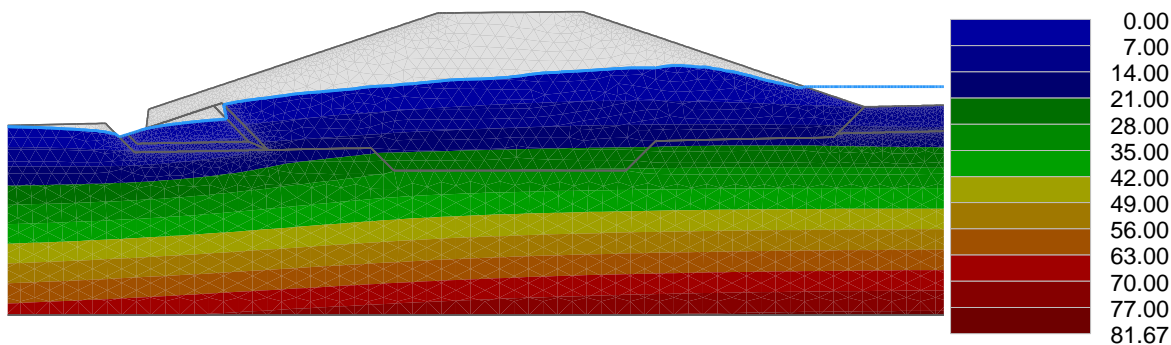
Obrázek 32: Fáze 8 - čas: 60 min, hladina: 546.51 m n.m.

Výsledky : celkové; veličina : Pórový tlak u_{wf} ; rozsah : <0.00; 82.47> kPa



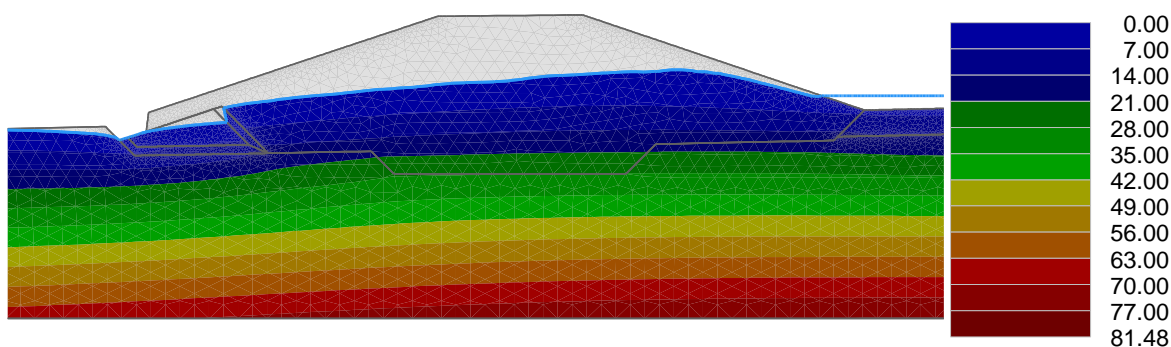
Obrázek 33: Fáze 11 - čas: 90 min, hladina: 546,25 m n.m.

Výsledky : celkové; veličina : Pórový tlak u_{wf} ; rozsah : <0.00; 81.67> kPa



Obrázek 34: Fáze 14 - čas: 120 min, hladina: 545,96 m n.m.

Výsledky : celkové; veličina : Pórový tlak u_{wf} ; rozsah : <0.00; 81.48> kPa



Obrázek 35: Fáze 16 - čas: 140 min, hladina: 545,76 m n.m.

6.7 Zhodnocení průsakové analýzy

Přes určitá zjednodušení model vykazuje po kalibraci obdobné trendy vývoje hladiny ve vrtech jako byly měřeny ve skutečnosti. V projektové dokumentaci [1] je uveden výpočet průsaku tělesem hráze při maximální hladině 548,20 m n.m. s výsledkem 1,5 l/s. Tento se do značné míry shoduje s výsledkem, kterého bylo dosaženo v této práci - 1,39 l/s.

7. DEFORMAČNÍ ANALÝZA

Deformační analýza proběhla v programu GEO5-MKP za užití nástroje „Stabilita svahu“. Byly modelovány stavy za situace rychlého vypouštění nádrže. Užité byly polohy hladin zjištěných v 6.6.2.

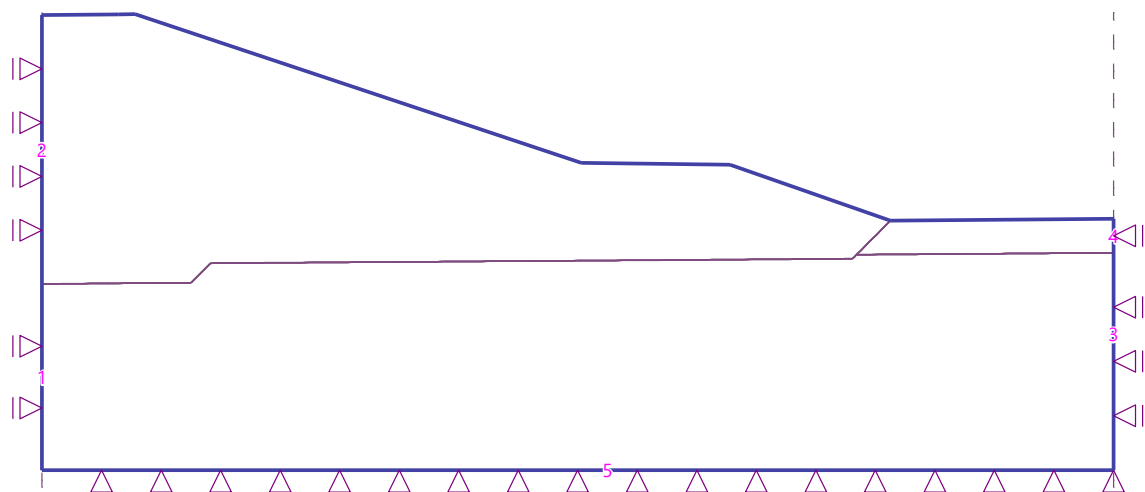
7.1 Topologie modelů

Při modelování celého tělesa hráze by při užití metodě docházelo vždy jen k výpočtu FS podle méně stabilního svahu a na druhý už by nebyl brán zřetel. Z toho důvodu byly oba řezy rozděleny napůl v ose hráze a tyto svahy modelovány odděleně, pojmenovány jako A pro vzdušní svah a B pro návodní. Touto cestou vznikly 4 modely výpočtu stability: řez7-7A, řez7-7B, řez8-8A a řez 8-8B.

Topologie a geometrie modelu je obdobná jako u výpočtu proudění, s tím rozdílem, že bylo “spraveno“ záměrné pokřivení linie vzdušního svahu, neboť by pravděpodobně způsobovalo značně odlišné výsledky a především, vzhledem ke kopírování hladin ze simulace vypouštění, již nebylo zapotřebí simulovat patní drén. V prvních modelech byly modelovány všechny součásti hráze, to ale vedlo k nestabilitě výpočtu, a tak bylo přistoupeno k homogenizaci a hráz byla rozdělena na stejné oblasti jako v případě průsakové analýzy. Generována byla v tomto případě jednotná síť víceuzlových trojúhelníkových prvků o délce hrany 0,4 m.

7.2 Okrajové podmínky

Okrajové podmínky byly stanoveny jako podpory – na spodní linii pevné v obou směrech na svislých krajních liniích pevné pouze ve směru vodorovném:



Obrázek 36: Okrajové podmínky řez 7-7B

Obdobně pro ostatní modely.

7.3. Parametry materiálů

Užit byl Mohr-Coulombův materiálový model teorie plasticity. Parametry materiálů byly převzaty z ČSN 73 1001 [16] a upraveny dle konzultací.

Tabulka 11: Stabilitní parametry materiálů

	γ	E	ν	α	γ_{sat}	E_{ur}	ϕ_{ef}	c_{ef}	ψ
materiál	[kN/m ³]	[Mpa]	[-]	[-]	[kN/m ³]	[Mpa]	[°]	[kPa]	[°]
materiál hráže - písčitohlinitá S4/SM	18.00	10.00	0.30	1.00	22.04	30.00	29.00	5.00	1.67
méně propustné zeminy F3/MS - hlinitopisčité	18.00	10.50	0.35	1.00	22.04	31.50	26.50	16.00	5.33
hutněná pláň S3/S-F	17.50	15.50	0.30	1.00	21.22	46.50	40.00	10.00	0.00
šterkový drenážní násyp	21.00	250.00	0.20	1.00	25.04	750.00	37.00	0.00	0.00
šterkopiskový filtr G3/G-F	19.00	85.00	0.25	1.00	22.97	255.00	32.50	0.00	0.00

Kde γ je objemová tíha zeminy, E modul pružnosti, ν Poissonovo číslo, α Biotův parametr, γ_{sat} objemová tíha saturované zeminy – vypočtená pro každý materiál na základě čísla pórovitosti e_0 (uvedeno v materiálových parametrech proudění – Tabulka 7), E_{ur} modul přitížení, ϕ_{ef} úhel vnitřního tření, c_{ef} soudržnost zeminy a ψ úhel dilatance.

7.4 Řez 7-7B

Řez 7-7B byl modelován v 10 fázích (deset variant zatížení) – v první fázi byl zkoumán stav zcela bez vody, v dalších fázích byla zadávána příslušná hladina z modelu vypouštění po intervalu 30 min, tedy v čase 0 min je hladina vody v nádrži na navrhované zásobní hladině 547 m n.m.

V každé fázi byl vypočten stupeň stability FS způsobem popsaným v kapitole 5. Dalším vhodným výstupem je rozložení ekvivalentního deviatorického plastického přetvoření, neboť to se vyvine podél smykové plochy.

Nejvyššího stupně stability FS = 2,20 dosáhl model před začátkem vypouštění, tedy v čase 0 min. Naopak nejmenšího stupně stability FS = 1,56 dosáhl shodně ve dvou posledních fázích modelu, tedy v časech 210 a 240 min.

Vývoj stupně stability FS v řezu 7-7B dokumentuje následující tabulka:

Tabulka 12: Vývoj FS, řez7-7B

čas [min]	bez vody	0	30	60	90
FS [-]	2.03	2.20	2.06	1.97	1.88
čas [min]	120	150	180	210	240
FS [-]	1.76	1.69	1.62	1.56	1.56

7.5 Řez 7-7A

V řezu 7-7A se s průběhem vypouštění mění hladina podzemní vody jen velmi málo. Modelovány tedy byly 4 fáze – zcela bez vody a v časech 0, 210 a 240 min.

Program neumožňuje zadat jakoukoli linii tak, že by další bod měl menší souřadnici x. Z toho důvodu bylo přistoupeno k drobné nepřesnosti při zadávání HPV v oblasti šterkopískového filtru.

Zatímco v suchém stavu vykazuje vzdušní svah velmi obdobný stupeň stability jako svah návodní, po zavedení účinku HPV (čas 0 min) se zmenší na FS=1,69.

Tabulka 13: Vývoj FS, řez7-7A

čas [min]	bez vody	0	210	240
FS [-]	2.06	1.69	1.72	1.52

7.6 Řez 8-8B

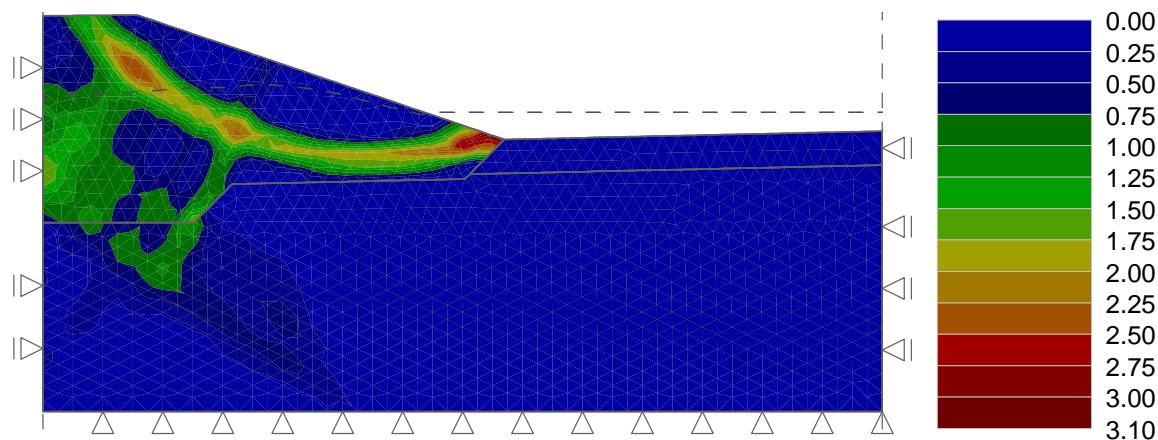
Řez 8-8B vykazuje obecně vyšší stupně stability než v přechozích případech, jak v situaci bez vody, tak v průběhu vypouštění:

Tabulka 14: Vývoj FS, řez8-8B

čas [min]	bez vody	0	30	60	90	120	140
FS [-]	2.17	2.23	2.09	1.98	1.88	1.83	1.78

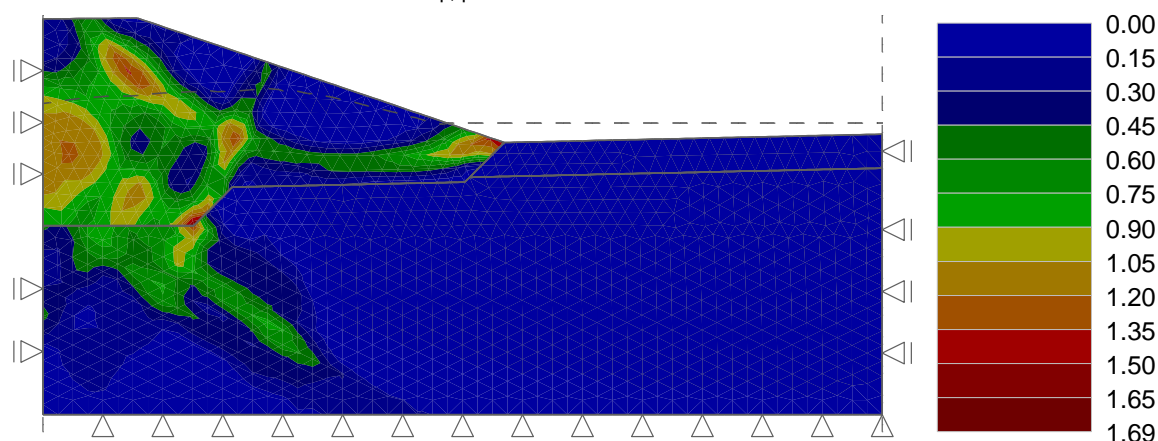
Vykreslení ekvivalentního deviatorického přetvoření ale poukazuje na jasnou smykovou plochu v posledních dvou fázích:

Výsledky : celkové; veličina : Epsilon_{eq., pl.}; rozsah : <0.00; 3.10> %



Obrázek 37: Vykreslení ekv. deviatorického plastického přetvoření, řez8-8B, 120 min

Výsledky : celkové; veličina : Epsilon_{eq., pl.}; rozsah : <0.00; 1.69> %



Obrázek 38: Vykreslení ekv. deviatorického plastického přetvoření, řez8-8B, 140 min

7.7 Řez 8-8A

Obdobně jako u řezu 7-7A bylo zapotřebí lehce deformovat průběh hladiny v oblasti šterkopískového filtru. Taktéž bylo z důvodu nepatrných změn hladiny v této půli řezu 8-8 přistoupeno k modelování pouze 3 fází – bez vody, před vypouštěním a na jeho konci. Stupně stability opět shrnuje tabulka:

Tabulka 15: Vývoj FS, řez8-8A

čas [min]	bez vody	0	140
FS [-]	2.09	1.74	1.74

7.8 Zhodnocení stabilitní analýzy

Nejmenší stupeň stability byl vypočten na konci vypouštění na vzdušném svahu většího řezu 7-7, redukované parametry, při poslední úspěšné iteraci jsou:

Tabulka 16: Redukované parametry, řez 7-7A

	ϕ_{ef}	c_{ef}
materiál	[°]	[kPa]
materiál hráze - písčitohlinitá S4/SM	15.22	2.62
šterkopiskový filtr G3/G-F	17.06	0
šterkový drenážní násyp	19.42	0
hutněná pláň S3/S-F	21	5.25

Tyto parametry jsou po srovnání s fázemi nejmenších stupňů stability v ostatních řezech těmi největšími, po kterých dochází k divergenci výpočtu a jako takové se tedy dají označit za mezní z hlediska stability.

Obecně vzato je zřejmé, že konstrukce je nejvíce namáhána ve všech řezech na konci vypouštění. Za předpokladu správnosti zavedených parametrů (model nebyl kalibrován) vyhoví i v případě nejméně příznivého stavu z hlediska hladiny podzemní vody.

8. ZÁVĚR

Byla úspěšně provedena jak průsaková, tak deformační analýza. Po kalibraci modelu proudění na základě měřených hladin v kontrolních vrtech byla potvrzena relevance výpočtu srovnáním s výsledky výpočtu uvedeného v projektové dokumentaci, neboť rozdíl ve vypočítaných hodnotách není velký (při maximální hladině na kótě 548,20 m n.m. činí dle projektové dokumentace průsak tělesem hráze 1,5 l/s, v této práci provedená průsaková analýza uvádí hodnotu 1,39 l/s).

Vypočítána byla velikost průsaku při navrhovaných zásobních hladinách 547 m n.m. – 0,82 l/s a 544,55 m n.m. – 0,19 l/s. Sběrné potrubí uložené v patním drénu je vzhledem k těmto hodnotám dimenzováno dostatečně a hladina podzemní vody by měla vždy zůstat v nezámrzné hloubce.

Rovněž byl úspěšně simulován průběh vypouštění nádrže při plně otevřené spodní výpusti a vypočítané hladiny podzemní vody byly užity ve stabilitní analýze.

Z výsledků 4 modelů zabývajících se stabilitou jednotlivých svahů lze vyvozovat, že za předpokladu správnosti užitých parametrů těleso hráze obstojí z hlediska stability i při nejméně příznivém stavu hladiny podzemní vody, který může v hrázi nastat. Je však zapotřebí zmínit, že deformační modely (na rozdíl od modelů proudění) nebyly nijak kalibrovány, a tak jejich výsledky nemohou být brány jako průkazné. Pro zcela průkaznou analýzu stability hráze by bylo zapotřebí odebrání vzorků všech materiálů a jejich rozbor v laboratoři.

.....

Praha, 6.1.2019

.....

Bc. Jan Štícha

9. SEZNAM LITERATURY A POUŽITÝCH PODKLADŮ

- [1] RŮŽIČKA, Martin. *B. Souhrnná technická zpráva: Dokumentace pro stavební povolení a provedení stavby*. Jindřichův Hradec: ALCEDO, 2007.
- [2] *Mapy.cz* [online]. b.r. [cit. 2017-04-03]. Dostupné z: <https://mapy.cz/zakladni?x=16.1080827&y=49.1337269&z=13&l=0&q=Dale%C5%A1ice>
- [3] ŽATECKÝ, Stanislav. *VD „Staré Město pod Landštejnem-suchá nádrž“ Souhrnná zpráva TBD o výstavbě*. Brno: VODNÍ DÍLA -TBD a.s., 2007.
- [4] *VD Landštejn. Povodí Moravy* [online]. b.r. [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: <http://www.pmo.cz/cz/o-podniku/vodni-dila/landstejn/>
- [5] BROŽA, Vojtěch. *Přehrady Čech, Moravy a Slezska*. Vyd. 1. Liberec: Knihy 555, 2005. ISBN 8086660117.
- [6] HLADÍK, Martin. *Přestavba suché ochranné nádrže Staré Město pod Landštejnem na nádrž s trvalým vodohospodářským provozem*. Praha, 2019. Diplomová práce. ČVUT, FSv. Vedoucí práce Ladislav Satrapa.
- [7] *Katalog společných zařízení pozemkových úprav* [online]. b.r. [cit. 2018-12-3]. Dostupné z: <http://geo102.fsv.cvut.cz/ksz/najdi-zarizeni/zobraz/105>
- [8] RŮŽIČKA, Martin. *F. Výkresová část: Dokumentace pro stavební povolení a provedení stavby*. Jindřichův Hradec: ALCEDO, 2007.
- [9] ŽATECKÝ, Stanislav. *SN Staré Město pod Landštejnem I.etapová zpráva o TBD: za období 4/2009 - 04/2013*. Brno: VODNÍ DÍLA -TBD a.s., 2013.
- [10] *GEO5 - Uživatelská příručka: Edice 2018*. Praha: Fine spol. s.r.o., 2018.
- [11] CÍSLEROVÁ, Milena a Tomáš VOGEL. *Transportní procesy*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1998. ISBN 80-010-1866-0.
- [12] ŠEJNOHA, Michal, Jan PRUŠKA, Tomáš JANDA a Miroslav BROUČEK. *Metoda konečných prvků v geomechanice: teoretické základy a inženýrské aplikace*. 1. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2015. ISBN 9788001057438.

- [13] ŠTÍCHA, Jan. *Numerická analýza vlhkostního režimu těsnicího jádra VD Dalešice: Numerical analysis of moisture regime in clay core of Dalešice dam*. Praha, 2017. Bakalářská práce. ČVUT, FSv. Vedoucí práce Miroslav Brouček.
- [14] JANDA, Martin. *Závěrečná zpráva o výsledcích inženýrskogeologického průzkumu pro stavbu suché protipovodňové hráze u Starého Města pod Landštejnem*. Křemže, 2007.
- [15] ČSN 75 2410 - *Malé vodní nádrže*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [16] ČSN 73 1001 - *Zakládání staveb: Základová půda pod plošnými základy*. Praha: Úřad pro normalizaci a měření, 1988.

10. SEZNAM OBRÁZKŮ, GRAFŮ, TABULEK A PŘÍLOH

10.1 Obrázky

Obrázek 1: Zájmová lokalita [2].....	5
Obrázek 2: Pohled na vzdušní svah hráze, autor: Martin Hladík, 26.9.2018	7
Obrázek 3: Výtokový objekt, autor: Martin Hladík, 26.11.2018	8
Obrázek 4: Skluz a odpadní koryto od bezpečnostního přelivu, zdroj: [7]	9
Obrázek 5: Orientační umístění řezů	19
Obrázek 6: Schéma užitého postupu	20
Obrázek 7: Zkušební napouštění SN, zdroj: [7], 17.4.2009	21
Obrázek 8: Materiály modelu	22
Obrázek 9: Kalibrační model.....	23
Obrázek 10: Simulace drenáže	23
Obrázek 11: Síť konečných prvků.....	24
Obrázek 12: Síť konečných prvků – zahuštění.....	24
Obrázek 13: Poloha kontrolních vrtů, autor: Martin Hladík, 26.9.2018	25
Obrázek 14: Schéma umístění vrtů v příčném řezu.....	25
Obrázek 15: Počáteční podmínka – poloha HPV	28
Obrázek 16: Okrajové podmínky – fáze 5, hladina kulminuje.....	28
Obrázek 17: Porovnání vypočtených a měřených hladin 15.4.	30
Obrázek 18: Porovnání vypočtených a měřených hladin 17.4.2009	31
Obrázek 19: Porovnání vypočtených a měřených hladin 20.4.2009	31
Obrázek 20: Model řezu 8-8.....	32
Obrázek 21: Fáze 1 - čas: 0 min, hladina: 547 m n.m	36
Obrázek 22: Fáze 5 - čas: 30 min, hladina: 546,76 m n.m	37
Obrázek 23: Fáze 8 - čas: 60 min, hladina: 546,51 m n.m	37
Obrázek 24: Fáze 11 - čas: 90 min, hladina: 546,25 m n.m	37
Obrázek 25: Fáze 14 - čas: 120 min, hladina: 545,96 m n.m	38
Obrázek 26: Fáze 17 - čas:150 min, hladina: 545,65 m n.m	38
Obrázek 27: Fáze 23 - čas: 180 min, hladina: 545,29 m n.m	38
Obrázek 28: Fáze 26 - čas: 210 min, hladina: 544,80 m n.m	39
Obrázek 29: Fáze 36 - čas: 240 min, hladina: 543,78 m n.m	39

Obrázek 30: Fáze 1 - čas: 0 min, hladina: 547 m n.m	39
Obrázek 31: Fáze 5 - čas: 30 min, hladina: 546,76 m n.m	40
Obrázek 32: Fáze 8 - čas: 60 min, hladina: 546.51 m n.m	40
Obrázek 33: Fáze 11 - čas: 90 min, hladina: 546,25 m n.m	40
Obrázek 34: Fáze 14 - čas: 120 min, hladina: 545,96 m n.m	41
Obrázek 35: Fáze 16 - čas: 140 min, hladina: 545,76 m n.m	41
Obrázek 36: Okrajové podmínky řez7-7B	43
Obrázek 37: Vykreslení ekv. deviatorického plastického přetvoření, řez8-8B, 120 min ..	45
Obrázek 38: Vykreslení ekv. deviatorického plastického přetvoření, řez8-8B, 140 min....	45

10.2 Tabulky

Tabulka 1: N-leté průtoky [1]	10
Tabulka 2: Časové fáze kalibračního modelu.....	27
Tabulka 3: Porovnání hladin ve vrtech.....	27
Tabulka 4: Předpokládané rozsahy vodivosti	29
Tabulka 5: Zhodnocení souborů vstupních parametrů	29
Tabulka 6: Soubor vstupních parametrů 1	29
Tabulka 7: Výsledný soubor vstupních parametrů 11	30
Tabulka 8: Velikost průsaku.....	33
Tabulka 9: Konzumční křivka SV	33
Tabulka 10: Průběh vypouštění	35
Tabulka 11: Stabilitní parametry materiálů	43
Tabulka 12: Vývoj FS, řez7-7B.....	44
Tabulka 13: Vývoj FS, řez7-7A	44
Tabulka 14: Vývoj FS, řez8-8B.....	44
Tabulka 15: Vývoj FS, řez8-8A	45
Tabulka 16: Redukované parametry, řez 7-7A.....	46

10.3 Grafy

Graf 1: Čára zatopených ploch a objemů	10
Graf 2: Hladina vody v nádrži a ve vrtech při zkušební napouštění	26
Graf 3: Průběh vypouštění.....	36

10.4 Přílohy

PŘÍLOHA 1 – PŘÍČNÉ ŘEZY HRÁZÍ [8]

PŘÍLOHA 2 – SITUACE HRÁZE [8]